



Уральский
федеральный
университет

имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина

Физико-
технологический
институт

Е. В. ВОСТРЕЦОВА
С. М. ЗРАЕНКО
Ю. В. ШИЛОВ

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Лабораторный практикум



Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Е. В. Вострецова, С. М. Зраенко, Ю. В. Шилов

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Лабораторный практикум

Рекомендовано методическим советом УрФУ
для студентов, обучающихся по укрупненным
группам направлений

09.00.00 — Информатика и вычислительная техника,
10.00.00 — Информационная безопасность,
11.00.00 — Электроника, радиотехника и системы связи

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2015

УДК 621.3.011.7(076.5)

ББК 31.211я73-5

В78

Рецензенты:

кафедра общепрофессиональных дисциплин технических специальностей Уральского технического института связи и информатики (зам. зав. кафедрой канд. техн. наук, доц. *Н. В. Будылдина*); канд. техн. наук, ст. науч. сотр. отдела динамических систем Института математики и механики Уральского отделения Российской академии наук *С. И. Кумков*

Научный редактор — канд. техн. наук, доц. *А. С. Лучинин*

Вострецова, Е. В.

В78 Теория электрических цепей : лабораторный практикум / Е. В. Вострецова, С. М. Зраенко, Ю. В. Шилов. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. — 136 с.

ISBN 978-5-7996-1500-0

В издании дано описание комплекса измерительных приборов и лабораторного стенда, а также методика проведения измерений при выполнении цикла из восьми лабораторных работ по курсам «Основы теории цепей», «Теория электрических цепей».

В практикуме приведены основные расчетные соотношения, требования по подготовке и порядок выполнения работ по исследованию линейных электрических цепей, а также рекомендации по оформлению отчета.

Библиогр.: 10 назв. Табл. 17. Рис. 49. Прил. 2.

УДК 621.3.011.7(076.5)

ББК 31.211я73-5

ISBN 978-5-7996-1500-0

© Уральский федеральный
университет, 2015

Оглавление

Введение	4
Лабораторная работа № 1 Измерение параметров сигналов и цепей	7
Лабораторная работа № 2 Простейшие электрические цепи при гармоническом воздействии ...	12
Лабораторная работа № 3 Анализ сложных линейных цепей	22
Лабораторная работа № 4 Индуктивно-связанные цепи	35
Лабораторная работа № 5 Частотные характеристики простейших электрических цепей.....	49
Лабораторная работа № 6 Резонансные явления в электрических цепях.....	59
Лабораторная работа № 7 Исследование пассивного четырехполюсника	75
Лабораторная работа № 8 Переходные процессы в цепях первого и второго порядков.....	87
Приложение 1 Описание приборов.....	103
Приложение 2 Описание лабораторного стенда.....	130
Список библиографических ссылок.....	135

Введение

Целью практикума по курсам «Основы теории цепей» и «Теория электрических цепей» является изучение и экспериментальное подтверждение основных теоретических положений, ознакомление с некоторыми измерительными приборами и овладение методикой основных электрических измерений.

Выполнение каждой работы состоит из четырех основных этапов:

1. Теоретическая часть.
2. Расчетная часть
2. Экспериментальная часть.
3. Составление отчета.

1. Теоретическая часть

Во время выполнения теоретической части студент должен обстоятельно ознакомиться с соответствующими разделами теоретического курса с использованием конспекта лекций и учебников [1–3].

2. Расчетная часть

а) выполнить требуемые предварительные расчеты (примеры можно посмотреть в задачнике [4]) и построить необходимые графики (числовые данные для расчетов находятся в лаборатории);

б) составить принципиальные и монтажные схемы эксперимента, продумать назначение каждого прибора и деталей лабораторной установки, а также порядок их включения;

в) подготовить ответы на контрольные вопросы.

3. Экспериментальная часть

Лабораторные работы поставлены коллективом кафедры «Теоретические основы радиотехники» УрФУ и в течение многих лет дорабатываются и выполняются в лаборатории «Основы теории цепей». Предыдущая редакция методических указаний к ним была подготовлена в 2005 году [5], [6]. Лабораторные работы выполняются бригадами по два человека в часы, предусмотренные расписанием.

Непосредственному выполнению каждой лабораторной работы предшествует теоретический коллоквиум — проверка подготовленности студентов. При этом студент представляет преподавателю оформленный отчет по предыдущей работе и все расчеты, графики и схемы, относящиеся к выполняемой работе.

Если представленные материалы признаны удовлетворительными, преподаватель задает контрольные вопросы, касающиеся предстоящей лабораторной работы.

Если материалы, представленные студентом, или его ответы на контрольные вопросы признаны неудовлетворительными, студент к выполнению лабораторной работы не допускается.

Студенты, допущенные к лабораторной работе, выполняют ее в соответствии с настоящими указаниями.

Все студенты должны быть ознакомлены (под расписку) с инструкцией по технике безопасности и правилами внутреннего распорядка в лаборатории.

При сборке установки студенты должны обращать особое внимание на выполнение монтажных схем. Монтажную схему следует собирать, используя наименьшее количество соединительных проводов. Все контактные соединения должны быть надежными и выполненными технически грамотно.

Расчеты, основанные на экспериментальных данных, выполняются в лаборатории в процессе работы. Кривые, снятые в лаборатории, вычерчиваются также в процессе работы.

Экспериментальная часть работы считается выполненной после просмотра и утверждения черновика отчета преподавателем.

4. Составление и сдача отчета

Отчет составляется каждым студентом индивидуально и оформляется в соответствии с требованиями стандарта.

В отчете должны быть отражены:

- цель работы;
- результаты расчетов;
- экспериментальная часть работы;
- выводы по выполненной работе.

По результатам выполнения расчетной части составляются и приводятся таблицы, графики, указанные в описании, необходимые расчеты. Расчетам должно предшествовать краткое объяснение методик расчета, расчетные формулы и соотношения с указанием первоисточника. Значения символов и числовых коэффициентов, входящих в формулу, расшифровываются в тексте отчета.

В разделе отчета, посвященном эксперименту, вычерчиваются схемы измерений с кратким объяснением методики эксперимента.

Рисунки и графики выполняются на листах белой или миллиметровой бумаги, помещаются после первого упоминания в тексте или в конце отчета в виде приложения; при размещении в тексте их размер должен быть не менее 10×15 см.

На графике вычерчивается координатная сетка, по осям представляются изменяющиеся величины с указанием размерности. Рисунки и графики снабжаются подрисуночными подписями.

Каждая таблица снабжается заголовком, в котором указаны ее номер и название.

Значения всех физических величин должны приводиться в единицах СИ или в кратных и дольных от них.

Выводы содержат анализ полученных результатов по всем пунктам задания, объяснение причин отклонения результатов эксперимента от расчетных величин, оценку погрешностей и т. д. Можно указать части работы, вызвавшие затруднения, дать рекомендации по улучшению лабораторного практикума.

В тексте отчета следует по возможности не использовать личные местоимения. Не допускается применять сокращения слов, кроме установленных правилами русского языка.

Лабораторная работа № 1

Измерение параметров сигналов и цепей

1. Цель работы

Целью работы является ознакомление с основными характеристиками и правилами пользования приборами, применяемыми в лабораторном практикуме, а также с устройством лабораторного стенда.

2. Подготовка к эксперименту

- 1) Изучить краткое описание приборов, использующихся в лаборатории.
- 2) Изучить описание лабораторного стенда.
- 3) Изучить описание лабораторной работы и продумать методику выполнения экспериментов.

3. Лабораторное задание

- 3.1. Измерение сопротивлений резисторов
Работа с универсальным вольтметром В7–77.
 - 3.1.1. Подготовить прибор к работе.
 - 3.1.2. Измерить сопротивления резисторов $R_1 — R_5$ из блока «Простые и сложные цепи». Ручка потенциометра должна быть установлена в положение максимального сопротивления.

3.1.3. Результаты измерений сравнить с номинальными значениями сопротивлений из таблицы данных, находящихся в лаборатории.

3.2. Измерение параметров гармонических колебаний

Работа с генератором GFG-8219A, вольтметром В7–77, осциллографом OS-5020.

Измерить амплитуду гармонических сигналов двумя способами: при помощи вольтметра и при помощи осциллографа. Измерить период колебаний при помощи осциллографа, рассчитать частоту, сравнить с заданной.

3.2.1. Включить генератор, осциллограф, подготовить их к работе.

3.2.2. Установить частоту колебаний генератора $F = 1$ кГц, амплитуду максимальную.

3.2.3. Измерить напряжение генератора при помощи вольтметра.

3.2.4. Подать сигнал генератора на вход осциллографа, измерить амплитуду и период колебаний. Соединение выхода генератора с входом осциллографа можно выполнить, используя гнезда блока «Простые и сложные цепи».

3.2.5. Зарисовать наблюдающийся сигнал, указать на рисунке масштабы, период и амплитуду.

3.3. Измерение параметров сигналов

Работа с генератором, осциллографом.

Измерить основные параметры импульсных сигналов генератора. Построить графики зависимостей напряжения от времени, указать на них основные параметры.

3.3.1. Установить регулировку уровня выхода генератора в крайнее правое положение, переключатель режима работы — в положение «прямоугольные импульсы», частоту сигнала $F = 1$ кГц.

3.3.2. Измерить основные параметры сигнала (период T , длительность τ , разность между максимальным и минимальным

значениями напряжения U_m). Зарисовать наблюдаемый сигнал с указанием масштабов по осям и основных его параметров.

3.3.3. Повторить пп. 1–2 для следующих режимов работы генератора:

- симметричные треугольные импульсы;
- прямоугольные импульсы с максимальной скважностью;
- прямоугольные импульсы с минимальной скважностью.

Для изменения скважности импульсной последовательности (отношения периода к длительности) вытянуть ручку DUTY на себя, повернуть до упора вправо (максимальная скважность) или влево (минимальная скважность).

3.4. Измерение разности фаз

Работа с генератором и осциллографом.

Измерения разности фаз между двумя напряжениями. Построить графики зависимости разности фаз от частоты.

3.4.1. Собрать схему (рис. 1.1).

3.4.2. Измерить сдвиг фаз между напряжениями U_1 и U_2 на частотах 1, 2, 5, 10, 100 кГц при помощи осциллографа и фазометра.

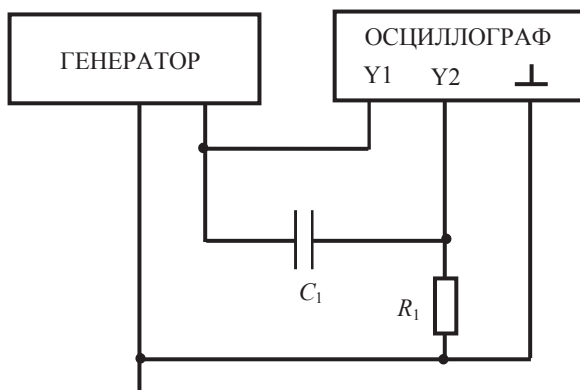


Рис. 1.1. Схема измерения разности фаз между входным напряжением и напряжением на сопротивлении

3.5. Измерение модуля реактивного сопротивления

Измерение сопротивления емкости на разных частотах косвенным методом.

При измерениях на емкость подается напряжение с заданными параметрами, измеряется ток, протекающий через емкость. Модуль сопротивления вычисляется как отношение напряжения к току:

$$X_c = \frac{U}{I}$$

3.5.1. Собрать схему (рис. 1.2). Установить амплитуду сигнала близкой к максимальной, измерить ее при помощи вольтметра.

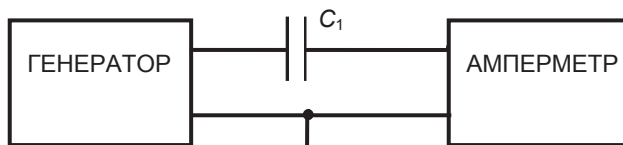


Рис. 1.2. Измерение модуля сопротивления емкости

3.5.2. Измерить ток через емкость на 6–8 частотах в диапазоне от 1 до 100 КГц.

3.5.3. Рассчитать модуль сопротивления емкости, построить график зависимости модуля сопротивления от частоты.

4. Требования к содержанию отчета

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- схемы измерений;
- таблицы результатов измерений и графики по каждому пункту задания;
- выводы.

5. Контрольные вопросы

1. Объясните назначение органов управления вольтметра В7–77.
2. Опишите порядок подготовки прибора В7–77 к измерению переменного напряжения.
3. Объясните назначение органов управления генератора GFG-8219A.
4. Объясните методику определения амплитуды и длительности импульса с помощью осциллографа OS-5020.
5. Поясните методику определения частоты гармонического сигнала с помощью осциллографа.
6. Поясните методику измерения сдвига фаз с помощью осциллографа.
7. Опишите порядок подготовки к работе осциллографа OS-5020.
8. Поясните методику измерения разности фаз.
9. Поясните методику измерения модуля реактивного сопротивления при помощи вольтметра и амперметра.
10. Изложите основные правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ.

Лабораторная работа № 2

Простейшие электрические цепи при гармоническом воздействии

1. Цель работы

Освоение метода комплексных амплитуд и экспериментальная проверка амплитудных и фазовых соотношений в линейных цепях при гармоническом воздействии.

2. Основные теоретические положения

Гармонические колебания — одна из наиболее распространенных форм тока и напряжения в электрических цепях. При гармоническом воздействии на линейную цепь реакция цепи в установившемся режиме — также гармоническая функция.

Для анализа цепей при гармоническом внешнем воздействии в установившемся режиме практически всегда применяется метод комплексных амплитуд. Комплексная амплитуда — величина, несущая информацию об амплитуде и начальной фазе гармонического колебания. Законы Кирхгофа формулируются не только для мгновенных значений токов и напряжений, но и для комплексных амплитуд и комплексных действующих значений токов и напряжений.

В рамках метода комплексных амплитуд участок цепи можно характеризовать его комплексным сопротивлением (закон Ома в комплексной форме).

Задача анализа цепи в этом случае решается в следующем порядке.

1. Формирование комплексной схемы замещения цепи:
 - переход от мгновенных значений токов и напряжений к их комплексным амплитудам (комплексным действующим значениям);
 - расчет комплексных сопротивлений (проводимостей) элементов.
2. Расчет комплексной схемы замещения:
 - составление системы уравнений электрического равновесия на основе законов Ома и Кирхгофа в комплексной форме;
 - решение системы уравнений и определение комплексных амплитуд (комплексных действующих значений) искоемых токов и напряжений;
 - проверка полученных результатов с использованием векторных диаграмм, баланса мощностей, законов Кирхгофа.
3. Переход от комплексных амплитуд (комплексных действующих значений) к мгновенным значениям токов, напряжений.

Метод комплексных амплитуд подробно изложен в литературе, например [1], [2].

Приведем основные расчетные соотношения данного метода.

Связь мгновенного значения напряжения (тока) и комплексной амплитуды:

$$u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi_U) \Leftrightarrow \dot{U}_m = U_m e^{j\varphi_U},$$

где $u(t)$ — мгновенное значение напряжения; U_m — амплитуда напряжения, [В]; ω — круговая частота, [рад/с]; φ_U — начальная фаза, [рад]; \dot{U}_m — комплексная амплитуда, [В].

Связь амплитудных и действующих значений гармонического напряжения:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \quad \dot{U} = \frac{\dot{U}_m}{\sqrt{2}}.$$

Закон Ома в комплексной форме:

$$\dot{U}_m = Z \dot{I}_m, \quad \dot{U} = Z \dot{I}, \quad \dot{I}_m = Y \dot{U}_m, \quad \dot{I} = Y \dot{U},$$

где Z — комплексное сопротивление, Y — комплексная проводимость участка цепи.

Законы Кирхгофа в комплексной форме:

$$\sum_k \dot{U}_{mk} = 0, \quad \sum_k \dot{U}_k = 0,$$

где k — число ветвей, входящих в контур,

$$\sum_n \dot{I}_{mn} = 0, \quad \sum_n \dot{I}_n = 0,$$

где n — число ветвей, связанных с узлом.

Соотношения между токами и напряжениями в идеализированных пассивных элементах цепи при гармоническом воздействии:

1. Сопротивление (R)

$$\dot{U}_{mR} = R \dot{I}_m; \quad \dot{I}_m = \frac{1}{R} \dot{U}_{mR}.$$

Комплексное сопротивление сопротивления

$$Z_R = R.$$

2. Индуктивность (L)

$$\dot{U}_{mL} = j\omega L \dot{I}_{mL}; \quad \dot{I}_{mL} = \frac{1}{j\omega L} \dot{U}_{mL}.$$

Комплексное сопротивление индуктивности

$$Z_L = jX_L = j\omega L.$$

3. Емкость (C)

$$\dot{U}_{mC} = \frac{1}{j\omega C} \dot{I}_{mC}; \quad \dot{I}_{mC} = j\omega C \dot{U}_{mC}.$$

Комплексное сопротивление емкости

$$Z_C = jX_C = -j \frac{1}{\omega C}.$$

Энергетические характеристики цепи:

1. Полная мощность (P_S)

$$P_S = UI = |\dot{S}| = \sqrt{P^2 + Q^2},$$

где U, I — действующие значения напряжения и тока.

2. Комплексная мощность (\dot{S})

$$\dot{S} = P_S e^{j\varphi} = \dot{U} \dot{I}^* = I^2 Z = P + jQ,$$

где \dot{I}^* — сопряженное комплексное действующее значение тока, φ — разность начальных фаз тока и напряжения

$$\varphi = \varphi_U - \varphi_I.$$

3. Активная мощность P

$$P = \operatorname{Re}\{\dot{S}\} = P_S \cos \varphi = I^2 r.$$

4. Реактивная мощность Q

$$Q = \operatorname{Im}\{\dot{S}\} = P_S \sin \varphi = I^2 x,$$

где r — активное сопротивление цепи, $r = \operatorname{Re}\{Z\}$, x — реактивное сопротивление цепи, $x = \operatorname{Im}\{Z\}$.

Баланс мощностей состоит в том, что сумма комплексных мощностей, отдаваемых всеми источниками, равна сумме комплексных мощностей, потребляемых всеми пассивными элементами.

3. Расчетная часть

Данные для расчета находятся в таблице в лаборатории.

3.1. Для последовательной RL -цепи (рис. 2.1) определите:

- комплексные сопротивления резистора и индуктивной катушки Z_R, Z_L :

$$Z_R = R, Z_L = R_L + jX_L,$$

- входное сопротивление цепи $Z = Z_R + Z_L$,
- комплексное действующее значение тока \dot{I} ,
- комплексные действующие значения напряжений на резисторе и индуктивной катушке \dot{U}_R, \dot{U}_L ,
- разность фаз между током и приложенным напряжением (начальную фазу источника ЭДС примите равной 0),
- активную P , реактивную Q и полную P_S мощности.

Расчет проведите для двух частот — f_1 и f_2 .

3.2. Постройте векторные диаграммы:

- напряжений на элементах и тока в цепи,
- мощностей P, Q, P_S , развиваемых в исследуемой цепи.

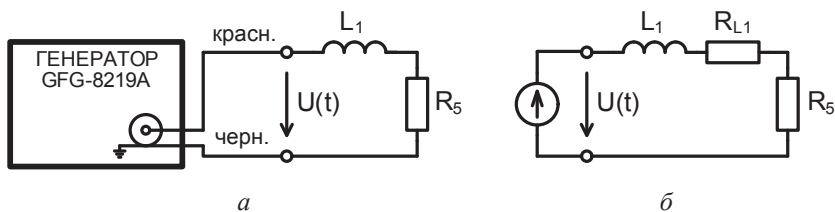


Рис. 2.1. Схемы исследуемой RL -цепи:

a — принципиальная, $б$ — эквивалентная

Векторные диаграммы строятся для каждой частоты в своей координатной сетке, на одном рисунке указывается и вектор тока, и векторы напряжений.

3.3. Для последовательной RLC -цепи (рис. 2.2) определите:

- комплексные сопротивления резистора, катушки, конденсатора Z_R , Z_L , Z_C ,
- входное сопротивление цепи Z ,
- комплексное действующее значение тока \dot{I} ,
- комплексные действующие значения напряжений на элементах \dot{U}_R , \dot{U}_L , \dot{U}_C ,
- разность фаз между током и приложенным напряжением (начальную фазу источника ЭДС примите равной 0),
- активную P , реактивную Q и полную P_S мощности.

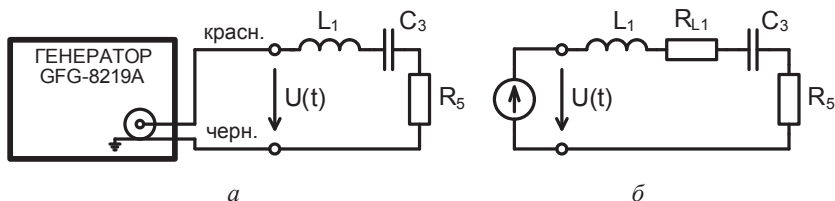


Рис. 2.2. Схемы исследуемой RLC -цепи:

a — принципиальная, $б$ — эквивалентная

Расчет схемы проведите для трех частот — f_1, f_2 и f_3 , где f_3 — частота, при которой модули реактивных сопротивлений индуктивности и емкости равны $|X_L| = |X_C|$.

3.4. Постройте векторные диаграммы:

- напряжений на элементах и тока в цепи,
- мощностей, развиваемых в исследуемой цепи.

3.5. Ознакомьтесь с указаниями по выполнению экспериментальной части лабораторной работы.

3.6. Нарисуйте и объясните схемы измерения фазового сдвига между током и входным напряжением в исследуемых цепях (используйте для этого описание к лабораторной работе № 1.)

4. Экспериментальная часть

Работа выполняется на блоке «Простые и сложные цепи».

4.1. При помощи универсального вольтметра В7–77 измерьте величины сопротивлений R_5 и R_{L1} и сравните их с заданными.

4.2. Соберите схему (рис. 2.1, а).

4.3. После проверки схемы преподавателем установите на генераторе GFG-8219A заданные параметры воздействия — гармоническую форму сигнала, частоту f_1 , заданное действующее значение напряжения U . Значение U измеряйте вольтметром В7–77, подключенным к входу цепи (параллельно генератору).

4.4. Измерьте действующие значения напряжений на элементах цепи при помощи вольтметра В7–77. Рассчитайте действующее значение тока I по падению напряжения на резисторе R_5 , используя закон Ома. Сравните полученные результаты с домашними расчетами.

4.5. Повторите пп. 4.3, 4.4 для частоты f_2 .

4.6. Измерьте разность фаз между током (напряжением на R_5) и приложенным к цепи напряжением U для частоты f_1 при помощи осциллографа OS-5020. Для этого:

- на генераторе GFG-8219A установите значение частоты f_1 ;
 - подключите первый канал осциллографа (CH1) к входу цепи (параллельно генератору), при этом «земля» приборов должна подключаться в одну точку;
 - подключите второй канал осциллографа (CH2) параллельно R_5 с соблюдением полярности («земля» должна подключаться в одну точку);
 - установите переключатели осциллографа MODE — в положение DUAL, TRIGGER SOURCE — в положение CH1;
 - установите сигналы в каналах осциллографа на одной изолинии, а длительность развертки — таким образом, чтобы наблюдать 1...2 периода колебания;
 - измерьте временной сдвиг Δt между сигналами, определите, отстает напряжение на R_5 от входного ($\Delta t < 0$) или опережает его ($\Delta t > 0$);
 - рассчитайте $\Delta\varphi = 2\pi f\Delta t$ [рад] или $\Delta\varphi = 360f\Delta t$ [град].
- 4.7. Повторите измерения п. 4.6 для частоты f_2 .
- 4.8. Соберите схему (рис. 2.2, а).
- 4.9. Повторите измерения амплитудных (U , U_R , U_L , U_C , I) и фазовых ($\Delta\varphi$) соотношений аналогично пп. 4.3–4.7 для частот f_1, f_2, f_3 .

5. Обработка результатов

- 5.1. По экспериментальным данным рассчитайте мощности P , Q , P_S для исследуемых схем для всех частот.
- 5.2. Составьте таблицу сравнения результатов расчетов и экспериментов (см. форму ниже).
- 5.3. По результатам экспериментов постройте векторные диаграммы токов, напряжений и мощностей в одних системах координат с диаграммами домашнего задания.

6. Требования к содержанию отчета

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- расчетную часть (исходные данные, комплексные схемы замещения, расчетные формулы с пояснениями, результаты расчетов);
- схемы исследуемых цепей и измерения фазового сдвига;
- таблицу экспериментальных и расчетных результатов (см. форму);
- векторные диаграммы токов и напряжений;
- выводы.

Таблица 2.1

Результаты расчета и эксперимента

Величина	Цепь									
	RL					RLC				
	f_1		f_2		f_1		f_2		f_3	
	р	э	р	э	р	э	р	э	р	э
I , мА										
U_R , В										
U_L , В										
U_C , В	—	—	—	—						
φ , град										
P_S , мВ·А										
P , мВт										
Q , мвар										

Примечание: р — рассчитанное значение; э — значение, полученное в результате эксперимента.

7. Контрольные вопросы

1. Укажите условия, от которых зависит выбор эквивалентной схемы замещения индуктивной катушки, конденсатора, резистора.

2. Поясните термины «начальная фаза», «сдвиг фаз между током и напряжением».
3. Чем вызван сдвиг фаз между током и напряжением в индуктивности и емкости?
4. Каковы фазовые соотношения между током и напряжением в сопротивлении, индуктивности и емкости?
5. Зависит ли разность фаз между током и напряжением в индуктивности и емкости от частоты внешнего воздействия?
6. В каких пределах может изменяться разность фаз между током и напряжением на зажимах пассивного двухполюсника?
7. Поясните методику построения векторных диаграмм.
8. Объясните суть баланса мощностей в электрической цепи.
9. Поясните методику измерения тока в данной работе.
10. Поясните, как связаны между собой векторные диаграммы напряжений и токов в цепи с векторной диаграммой комплексной мощности.
11. Поясните термины «принципиальная схема электрической цепи» и «эквивалентная схема электрической цепи».
12. Что означает опережение и запаздывание гармонического сигнала?
13. Как определить с помощью двухканального осциллографа сдвиг фаз между током и напряжением в цепи?
14. Поясните методику расчета цепи методом комплексных амплитуд.

Лабораторная работа № 3

Анализ сложных линейных цепей

1. Цель работы

Освоение и сравнение методов расчета сложных электрических цепей при гармоническом воздействии: методов контурных токов, узловых напряжений и метода наложения. Экспериментальная проверка методов.

2. Основные теоретические положения

Метод контурных токов

Метод контурных токов основан на важной топологической особенности электрических цепей: токи всех ветвей цепи могут быть выражены через токи главных ветвей.

Для определения токов главных ветвей (контурных токов) составляют систему из контурных уравнений.

На практике контурные уравнения формируют не прибегая к составлению основной системы уравнений электрического равновесия по законам Кирхгофа, поэтому применение этого метода позволяет упростить и составление, и решение уравнений электрического равновесия цепи.

В матричной форме система контурных уравнений записывается в следующем виде:

$$[Z_k] \cdot [\dot{I}_k] = [\dot{E}_k],$$

где $[Z_k]$ — матрица сопротивлений контуров, $[\dot{I}_k]$ — матрица контурных токов, $[\dot{E}_k]$ — матрица контурных ЭДС.

$$[Z_k] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2n} \\ \dots & & & \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix}, [\dot{I}_k] = \begin{bmatrix} \dot{I}_{11} \\ \dot{I}_{22} \\ \dots \\ \dot{I}_{nn} \end{bmatrix}, [\dot{E}_k] = \begin{bmatrix} \dot{E}_{11} \\ \dot{E}_{22} \\ \dots \\ \dot{E}_{nn} \end{bmatrix},$$

$n = (p - q + 1)$ — число независимых контуров, где p — число ветвей, q — число узлов цепи.

Правила составления контурных уравнений

1. Формирование $[Z_k]$. Элементы матрицы формируются следующим образом:

Z_{ii} — собственное сопротивление i -го контура, это сумма сопротивлений всех ветвей, входящих в этот контур.

Z_{ij} — взаимное или общее сопротивление i -го и j -го контуров, равно сумме сопротивлений ветвей, общих для i -го и j -го контуров. Взаимное сопротивление берется со знаком «плюс», если контурные токи протекают через общие ветви в одинаковом направлении; и со знаком «минус», если контурные токи в общих ветвях имеют противоположные направления. Если рассматриваемые контуры не имеют общих ветвей, то их взаимное сопротивление равно нулю.

Для линейных цепей, составленных только из сопротивлений, емкостей, индуктивностей и независимых источников напряжения, матрица контурных сопротивлений квадратная и симметричная относительно главной диагонали.

2. Формирование $[\dot{I}_k]$.

Это матрица-столбец неизвестных контурных токов.

3. Формирование $[\dot{E}_k]$.

\dot{E}_{ii} — контурная ЭДС i -го контура, это алгебраическая сумма ЭДС всех источников напряжения, входящих в данный контур. Если направление ЭДС какого-либо источника, входящего в i -й контур, совпадает с направлением контурного тока этого контура, то соответствующая ЭДС берется со знаком «плюс», в противном случае — со знаком «минус».

Решая систему контурных уравнений любым из методов, можно найти все неизвестные контурные токи цепи.

Например, выражение для контурного тока k -го контура при использовании формулы Крамера:

$$\dot{I}_{kk} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_{ik}}{\Delta} \dot{E}_{ii},$$

где Δ — определитель системы уравнений; Δ_{ik} — алгебраическое дополнение элемента Z_{ik} этого определителя. На практике обычно используют более эффективные методы вычислений, такие, например, как метод исключения Гаусса.

Если электрическая цепь содержит независимые источники тока, то их следует заменить независимыми источниками напряжения с помощью эквивалентных преобразований либо выбрать дерево цепи таким образом, чтобы ветви с источниками тока вошли в состав главных ветвей. Количество неизвестных контурных токов сокращается при этом на число независимых источников тока. Матрица контурных сопротивлений в этом случае будет не квадратной: число столбцов будет равно числу независимых контуров, а число строк — числу неизвестных контурных токов.

Метод узловых напряжений

Метод формирования уравнений электрического равновесия цепи, в котором в качестве независимых переменных используются напряжения узлов относительно базисного, называется методом узловых напряжений. Напряжения всех ветвей электрической цепи могут быть выражены через узловые напряжения. При этом напряжение базисного узла принимается равным нулю.

На практике узловые уравнения формируют не прибегая к составлению основной системы уравнений электрического равновесия, поэтому применение этого метода позволяет упростить и составление, и решение уравнений.

В матричной форме система узловых уравнений записывается в следующем виде:

$$[Y_y] \cdot [\dot{U}_y] = [J_y],$$

где $[Y_y]$ — матрица проводимостей узлов, $[\dot{U}_y]$ — матрица узловых напряжений, $[J_y]$ — матрица узловых токов.

$$[Y_y] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1m} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2m} \\ \dots & & & \\ Y_{m1} & Y_{m2} & \dots & Y_{mm} \end{bmatrix}, \quad [\dot{U}_y] = \begin{bmatrix} \dot{U}_{11} \\ \dot{U}_{22} \\ \dots \\ \dot{U}_{mm} \end{bmatrix}, \quad [J_y] = \begin{bmatrix} j_{11} \\ j_{22} \\ \dots \\ j_{mm} \end{bmatrix},$$

$m = (q - 1)$ — число независимых узлов, где q — общее число узлов цепи.

Правила составления узловых уравнений

1. Формирование $[Y_y]$. Элементы матрицы формируются следующим образом:

Y_{ii} — собственная проводимость i -го узла — это сумма проводимостей всех ветвей, подключенных к данному узлу.

Y_{ij} — взаимная проводимость i -го и j -го узлов — это сумма проводимостей всех ветвей, включенных непосредственно между i -м и j -м узлами, взятая с противоположным знаком. Если в цепи отсутствуют ветви, включенные непосредственно между i -м и j -м узлами, то $Y_{ij} = 0$.

Для линейной электрической цепи, состоящей только из сопротивлений, емкостей, индуктивностей и независимых источников тока, матрица узловых проводимостей квадратная и симметричная относительно главной диагонали.

2. Формирование $[\dot{U}_y]$.

Это матрица-столбец неизвестных узловых напряжений.

3. Формирование $[\dot{J}_y]$.

\dot{J}_{ij} — узловой ток i -го узла, это алгебраическая сумма токов всех источников тока, подключенных к данному узлу. Если ток какого-либо источника тока направлен к узлу, то он берется со знаком «плюс», если ток направлен от узла, то он берется со знаком «минус».

Решая систему узловых уравнений любым из методов, можно найти все неизвестные узловые напряжения цепи.

Например, выражение для напряжения k -го узла при использовании формулы Крамера:

$$\dot{U}_{kk} = \sum_{i=1}^m \frac{\Delta_{ik}}{\Delta} \dot{J}_{ii},$$

где Δ — определитель системы уравнений; Δ_{ik} — алгебраическое дополнение элемента Y_{ik} этого определителя.

Если цепь содержит независимые источники напряжения, то их следует заменить независимыми источниками тока с помощью эквивалентных преобразований. Либо составить систему уравнений с учетом того, что не все узловые напряжения будут независимы: узловые напряжения двух узлов, между ко-

торыми включен идеальный источник напряжения, будут отличаться только на величину ЭДС этого источника. Если в качестве базисного выбрать узел, к которому подключен идеальный источник напряжения, то количество неизвестных узловых напряжений сокращается при этом на число источников напряжений. Матрица проводимостей узлов в этом случае будет не квадратной: число столбцов будет равно числу независимых узлов, а число строк — числу неизвестных узловых напряжений.

Метод наложения

Метод наложения позволяет рассчитывать реакцию цепи на сложное воздействие. Реакция линейной цепи на произвольное внешнее воздействие, представляющее собой линейную комбинацию более простых воздействий, равна линейной комбинации реакций, вызванных каждым из простых воздействий в отдельности.

Таким образом, ток или напряжение любой ветви линейной электрической цепи, содержащей наряду с пассивными элементами зависимые и независимые источники тока и напряжения, равны сумме частичных токов или напряжений, вызванных действием каждого независимого источника в отдельности.

3. Расчетная часть

3.1. Определите комплексные действующие значения токов в ветвях и напряжений на элементах цепи методами:

- а) контурных токов;
- б) узловых напряжений;
- в) наложения (в ветви C_1R_3).

Принципиальная схема цепи изображена на рис. 3.1, эквивалентная схема замещения — на рис. 3.2. Параметры элементов для каждого лабораторного стенда приведены в таблице, нахо-

дятся в лаборатории. Начальную фазу ЭДС источников \dot{E}_1 и \dot{E}_2 примите равной 0.

3.2. Проверьте правильность расчетов по балансу мощностей.

3.3. По результатам расчетов постройте векторные диаграммы токов и напряжений на элементах.

3.4. Ознакомьтесь с содержанием эксперимента и продумайте порядок его выполнения.

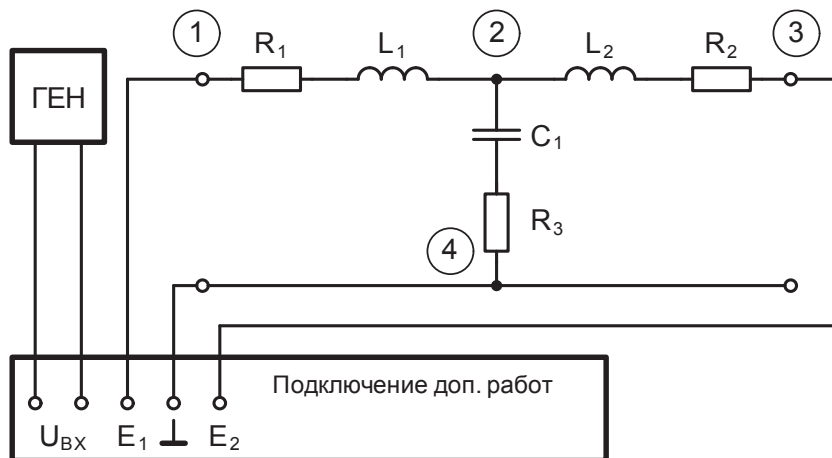


Рис. 3.1. Принципиальная схема лабораторной установки

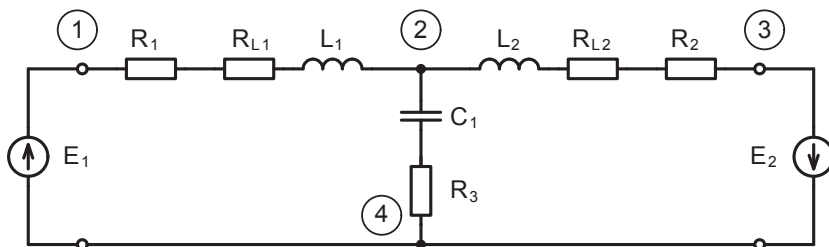


Рис. 3.2. Эквивалентная схема исследуемой цепи

4. Экспериментальная часть

Работа выполняется на блоке «Простые и сложные цепи».

4.1. Измерьте с помощью универсального вольтметра В7–77 величины сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 , R_{L1} , R_{L2} , сравните их с табличными данными.

4.2. Соберите электрическую цепь в соответствии со схемой на рис. 3.1. Выход генератора GFG-8219A соедините с клеммами $U_{ВХ}$ блока «Подключение дополнительных работ» (полярность выводов генератора в данном случае значения не имеет). Клеммы E_1 и E_2 будут соответствовать зажимам источников ЭДС E_1 и E_2 .

4.3. После проверки схемы преподавателем включите генератор. Установите параметры выходного напряжения генератора — гармонический сигнал, частоту и действующее значение — в соответствии с данными домашнего задания. Измерьте вольтметром В7–77 действующие значения ЭДС E_1 и E_2 в собранной цепи, убедитесь, что они соответствуют заданным значениям, при необходимости подкорректируйте, изменяя выходное напряжение генератора.

4.4. Измерьте вольтметром В7–77 действующие значения напряжений на всех элементах цепи.

4.5. Рассчитайте действующие значения токов всех ветвей $I = U_R / R$.

4.6. Определите сдвиги фаз между токами в ветвях и ЭДС источников. Имеющееся в лаборатории оборудование позволяет определить разность фаз между двумя напряжениями. При определении сдвигов фаз воспользуйтесь тем, что токи в ветвях синфазны с напряжениями на резисторах R_1 , R_2 , R_3 .

4.6.1. Для измерения сдвига фаз между U_{R1} и E_1 узел 1 соедините с общим выводом кабеля осциллографа (рис. 3.3). При этом фактически измеряется сдвиг фаз между U_{R1} и $(-E_1)$. Искомый фазовый сдвиг рассчитывается по результатам измерений временного сдвига между сигналами, см. лабораторную работу № 2, п. 4.6.

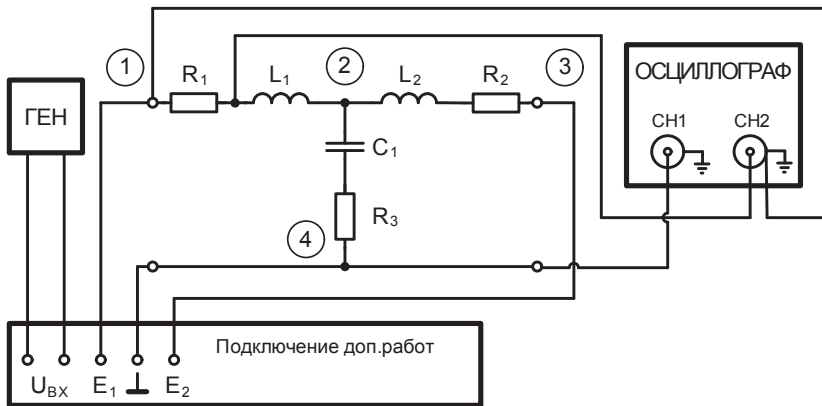


Рис. 3.3. Схема измерения фазового сдвига между U_{R1} и $(-E1)$

4.6.2. Для измерения сдвига фаз между U_{R3} и E_1 с общим выводом кабеля осциллографа следует соединить узел 4 (рис. 3.4).

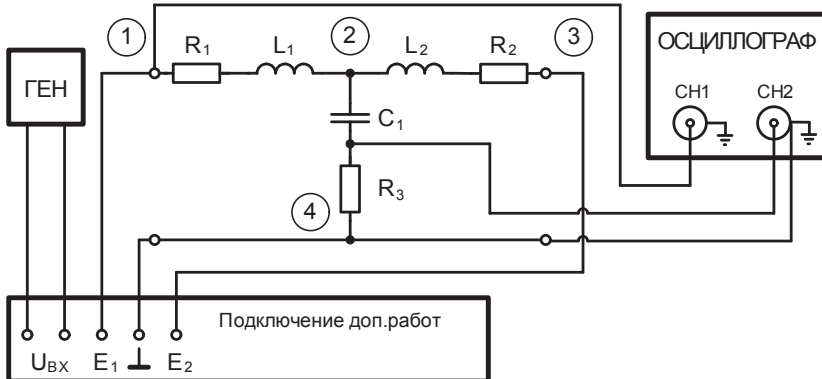


Рис. 3.4. Схема измерения фазового сдвига между U_{R3} и E_1

4.6.3. Для измерения сдвига фаз между U_{R2} и $(-E_2)$ общий вывод осциллографа соединяется с узлом 3 (рис. 3.5).

4.7. Проверьте выполнение теоремы наложения для ветви $C_1 R_3$.

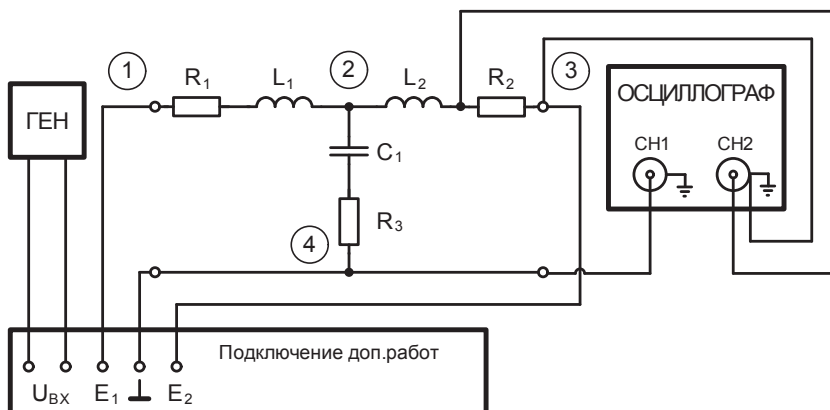


Рис. 3.5. Схема измерения фазового сдвига между U_{R2} и $(-E_2)$

4.7.1. Замените источник E_1 перемычкой. Установите действующее значение ЭДС E_2 равным заданному в таблице исходных данных (измеряйте вольтметром В7–77). Измерьте вольтметром В7–77 действующее значение напряжения на сопротивлении R_3 — U_{R3}' и сдвиг фаз между U_{R3}' и E_2 (схема подключения осциллографа приведена на рис. 3.6).

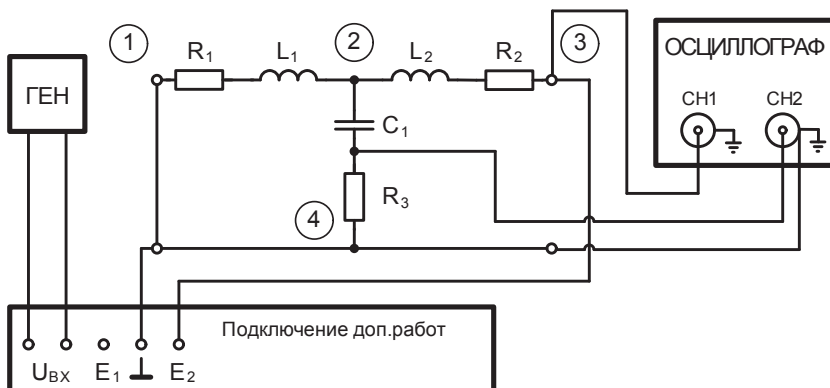


Рис. 3.6. Схема измерения фазового сдвига между U_{R3}' и E_2 при проверке теоремы наложения

4.7.2. Подключите E_1 (предварительно отключив перемычку). Замените источник E_2 перемычкой. Повторите измерения аналогично п. 4.7.1, измерьте U_{R3} и разность фаз между U_{R3} и E_1 (схема подключения осциллографа аналогична рис. 3.4).

4.7.3. Используя принцип наложения, определите U_{R3} .

5. Обработка результатов

5.1. По результатам п. 3.1 и пп. 4.4–4.6 составьте таблицу сравнения рассчитанных и измеренных напряжений и токов.

Таблица 3.1

Величина	Расчет		Эксперимент
	конт. токов	узл. напр.	
U_{R1} , В			
U_{L1} , В			
U_{R2} , В			
U_{L2} , В			
U_{R3} , В			
U_{C1} , В			
I_1 , мА			
I_2 , мА			
I_3 , мА			
$\Delta\varphi_{I1E1}$, град			
$\Delta\varphi_{I2E2}$, град			
$\Delta\varphi_{I3E1}$, град			

5.2. Постройте векторную диаграмму в одних координатах с диаграммой домашнего задания.

5.3. По результатам п. 4.7 и расчетам методом наложения составьте таблицу сравнения значений.

Таблица 3.2

	$U_{R3}', \text{ В}$ (E_1 откл.)	$U_{R3}'', \text{ В}$ (E_2 откл.)	$\Delta\phi U_{R3}' E_2,$ град	$\Delta\phi U_{R3}'' E_1,$ град	$U_{R3}, \text{ В}$
расчет					
эксп.					

6. Требования к содержанию отчета

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- расчетную часть (исходные данные, эквивалентную схему цепи, расчетные формулы с пояснениями, результаты расчетов);
- схему лабораторной установки;
- таблицы сравнения экспериментальных и расчетных результатов;
- векторные диаграммы токов и напряжений, построенные по результатам расчетов и эксперимента;
- выводы.

7. Контрольные вопросы

1. Поясните методику расчета цепей методом контурных токов.
2. Поясните методику расчета цепей методом узловых напряжений.
3. Какие существуют ограничения при использовании метода контурных токов? Метода узловых напряжений?
4. В чем суть эквивалентных преобразований электрической цепи (приведите примеры)? Для чего они применяются?
5. Что такое полная и частичная эквивалентность?

6. В чем состоит эквивалентность источников электрической энергии — источника тока и источника напряжения?
7. Сформулируйте и объясните принцип наложения (суперпозиции).
8. Сформулируйте и объясните теорему об эквивалентном источнике.
9. Поясните методики определения фазовых сдвигов в данной работе.
10. Предложите иные, не использовавшиеся в данной работе методы расчета цепи, изображенной на рис. 3.1.
11. Применимы ли изученные вами методы расчета к нелинейным электрическим цепям?

Лабораторная работа № 4

Индуктивно–связанные цепи

1. Цель работы

Овладение методами расчета и измерения параметров цепей с взаимной индуктивностью. Экспериментальное определение основных параметров трансформаторов.

2. Основные теоретические положения

Две или более индуктивных катушек называются связанными, если изменение тока одной из катушек вызывает появление ЭДС в остальных. Явление наведения ЭДС в какой-либо индуктивной катушке при изменении тока другой катушки называется взаимоиндукцией, а наведенная ЭДС — ЭДС взаимоиндукции.

Для анализа цепей с взаимной индуктивностью при гармоническом воздействии целесообразно использовать метод комплексных амплитуд. Компонентные уравнения двух связанных индуктивностей в комплексной форме записываются в следующем виде:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= j\omega L_1 \dot{I}_1 \pm j\omega M \dot{I}_2, \\ \dot{U}_2 &= j\omega L_2 \dot{I}_2 \pm j\omega M \dot{I}_1.\end{aligned}$$

Комплексное действующее значение напряжения на каждой из связанных индуктивностей содержит два слагаемых:

- напряжение на комплексном сопротивлении индуктивности $Z_L = j\omega L$, вызванное протекающим по ней током,
- напряжение на комплексном сопротивлении связи $Z_M = j\omega M$, вызванное протекающим током в другой индуктивности.

$$\dot{U}_1 = Z_{L1} \dot{I}_1 \pm Z_M \dot{I}_2,$$

$$\dot{U}_2 = Z_{L2} \dot{I}_2 \pm Z_M \dot{I}_1.$$

Если индуктивной связью охвачено n индуктивностей, то комплексные действующие значения напряжений на их зажимах определяются системой уравнений:

$$\dot{U}_1 = Z_{L1} \dot{I}_1 \pm Z_{M12} \dot{I}_2 \pm \dots \pm Z_{M1n} \dot{I}_n,$$

$$\dot{U}_2 = \pm Z_{M21} \dot{I}_1 + Z_{L2} \dot{I}_2 \pm \dots \pm Z_{M2n} \dot{I}_n,$$

$$\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot$$

$$\dot{U}_n = \pm Z_{Mn1} \dot{I}_1 \pm Z_{Mn2} \dot{I}_2 \pm \dots + Z_{Ln} \dot{I}_n.$$

Напряжения на сопротивлениях связи берут со знаком «плюс» при согласном включении индуктивностей, т.е. когда токи протекают в одном направлении через одноименные зажимы, и со знаком «минус» — при встречном, т.е. когда токи протекают в разных направлениях по отношению к одноименным зажимам.

Система уравнений электрического равновесия цепи с взаимными индуктивностями так же, как и системы основных уравнений цепей, не содержащих взаимных индуктивностей, формируется из компонентных уравнений (уравнений ветвей), а также уравнений баланса токов и напряжений, составлен-

ных на основании законов Кирхгофа. Вид и количество уравнений, составляемых на основании законов Кирхгофа, определяются только топологией цепи и не зависят от входящих в нее элементов.

Трансформатор — это устройство для передачи энергии из одной части электрической цепи в другую, основанное на использовании явления взаимной индукции. Трансформатор состоит из нескольких связанных индуктивных катушек (обмоток). Обмотка, подключенная к источнику энергии, называется первичной, остальные обмотки называются вторичными. Часто обмотки размещены на общем ферромагнитном сердечнике для уменьшения потоков рассеяния и повышения индуктивности катушек. Трансформатор с ферромагнитным сердечником представляет собой устройство с нелинейными характеристиками, так как свойства магнитных материалов существенно зависят от напряженности пронизывающих их магнитных полей и, следовательно, от создающих эти поля токов. Процессы в таком трансформаторе описываются при помощи нелинейных дифференциальных уравнений.

В трансформаторе без ферромагнитного сердечника электрические процессы могут быть описаны линейными дифференциальными уравнениями, поэтому такой трансформатор называется линейным.

В ряде случаев, когда нелинейность магнитных материалов не оказывает существенного влияния на характеристики трансформатора с ферромагнитным сердечником, его приближенно рассматривают как линейный.

Линейный двухобмоточный трансформатор можно рассматривать как две связанные катушки с линейной индуктивностью (рис. 4.1). Сопротивления R_1 и R_2 учитывают потери энергии в обмотках трансформатора.

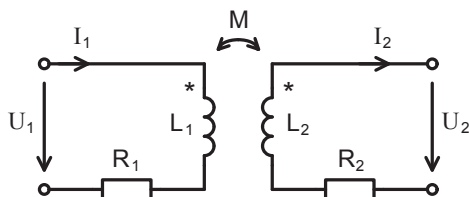


Рис. 4.1. Эквивалентная схема линейного двухобмоточного трансформатора

При гармоническом внешнем воздействии уравнения, описывающие трансформатор, имеют вид:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= (R_1 + j\omega L_1)\dot{I}_1 - j\omega M\dot{I}_2, \\ -\dot{U}_2 &= (R_2 + j\omega L_2)\dot{I}_2 - j\omega M\dot{I}_1.\end{aligned}$$

Эти уравнения равносильны следующим:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= (R_1 + j\omega(L_1 - M) + j\omega M)\dot{I}_1 - j\omega M\dot{I}_2, \\ -\dot{U}_2 &= (R_2 + j\omega(L_2 - M) + j\omega M)\dot{I}_2 - j\omega M\dot{I}_1.\end{aligned}$$

Данные уравнения являются контурными уравнениями для схемы на рис. 4.2.

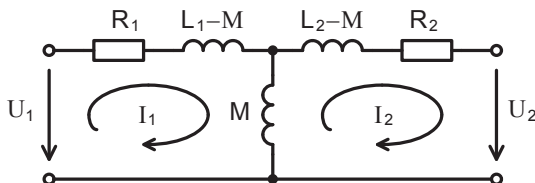


Рис. 4.2. Схема замещения линейного трансформатора, не содержащая связанных индуктивностей (приведенная схема замещения)

При одинаковом числе витков первичной и вторичной обмоток разности $(L_1 - M)$ и $(L_2 - M)$ имеют физический смысл индуктивностей рассеяния.

Если трансформатор работает в режиме холостого хода, т. е. нагрузка к вторичной обмотке не подключена, то в первичной обмотке будет протекать ток, называемый током намагничивания:

$$\dot{I}_{1xx} = \frac{\dot{U}_1}{R_1 + j\omega L_1}$$

Совершенным трансформатором называется идеализированный четырехполюсный элемент, представляющий собой две связанные индуктивности с коэффициентом связи $k = M / \sqrt{L_1 L_2}$, равным единице. В совершенном трансформаторе $R_1 = R_2 = 0$, $M = \sqrt{L_1 L_2}$, и уравнения, связывающие токи и напряжения обмоток, имеют вид:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \dot{U}_2, \\ \dot{I}_1 &= \left(\sqrt{\frac{L_2}{L_1}} + \frac{Z_H}{j\omega L_1} \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \right) \dot{I}_2,\end{aligned}$$

где Z_H — комплексное сопротивление нагрузки.

Коэффициент трансформации n определяется числом витков N_1 , N_2 или индуктивностями L_1 , L_2 обмоток:

$$n = \frac{N_2}{N_1} = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}.$$

Совершенный трансформатор, ток намагничивания которого равен нулю, что возможно при стремлении индуктивностей обмоток к бесконечности, называется идеальным трансформатором. Компонентные уравнения идеального трансформатора имеют вид:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \frac{\dot{U}_2}{n}, \\ \dot{I}_1 &= n\dot{I}_2.\end{aligned}$$

Из компонентных уравнений следует, что при любом значении сопротивления нагрузки отношение напряжения вторичной обмотки к напряжению первичной обмотки идеального трансформатора равно отношению токов первичной и вторичной обмоток и равно коэффициенту трансформации:

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} = n.$$

В связи с тем, что коэффициент трансформации n является действительным числом, напряжение и ток первичной обмотки имеют такие же начальные фазы, как соответственно напряжение и ток вторичной обмотки, и отличаются от них только по амплитуде.

Мгновенная и комплексная мощности, потребляемые первичной обмоткой, равны мгновенной и комплексной мощностям, отдаваемым идеальным трансформатором в нагрузку:

$$\dot{U}_1 \dot{I}_1^* = \dot{U}_2 \dot{I}_2^*,$$

т. е. КПД идеального трансформатора равен единице.

Если к вторичной обмотке идеального трансформатора подключено сопротивление нагрузки Z_H , то его входное сопротивление со стороны первичной обмотки равно

$$Z_1 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{\dot{U}_2}{n^2 \dot{I}_2} = \frac{Z_H}{n^2}.$$

Таким образом, входное сопротивление идеального трансформатора отличается от сопротивления нагрузки по модулю в n^2 раз. Это свойство трансформатора широко используется в радиоэлектронных устройствах для согласования сопротивления источника энергии с нагрузкой.

В отличие от идеального, в реальном трансформаторе происходят потери энергии, он характеризуется в ряде случаев значительными паразитными емкостями, индуктивность его обмоток имеет конечное значение, а потоки рассеяния не равны нулю. Как правило, при разработке конструкции трансформатора принимается ряд мер, направленных на приближение его свойств к свойствам идеального трансформатора.

3. Расчетная часть

3.1. Выведите расчетные формулы для обработки экспериментальных данных, которые будут получены при выполнении пунктов 4.1 и 4.2 (формулы для расчета индуктивности катушек L_1 , L_2 и взаимной индуктивности M). Эквивалентная схема трансформатора показана на рис. 4.3. L_1 и L_2 — индуктивности обмоток трансформатора, M — взаимная индуктивность между первичной и вторичной обмотками, R_1 и R_2 — измерительные сопротивления, предназначенные для определения токов, протекающих по обмоткам, R_{L1} и R_{L2} — сопротивления потерь обмоток трансформатора.

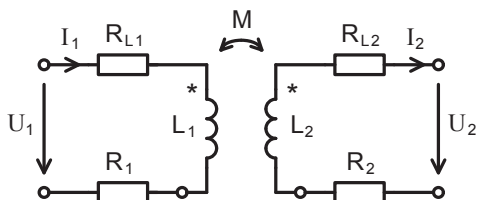


Рис. 4.3. Эквивалентная схема лабораторного блока

3.2. Рассчитайте комплексные действующие значения токов и напряжений на элементах схемы замещения трансформатора (рис. 4.2), сопротивления R_1 и R_2 считайте элементами трансформатора:

а) в режиме «холостого хода» (при разомкнутой вторичной обмотке трансформатора);

б) в режиме «нагрузки» (в качестве нагрузки используется сопротивление R_3).

Постройте векторные диаграммы токов и напряжений для указанных режимов работы.

3.3. По приведенной схеме замещения (рис. 4.2) рассчитайте и постройте амплитудно-частотную характеристику трансформатора (зависимость модуля коэффициента передачи трансформатора по напряжению от частоты — $K_U(\omega) = U_2 / U_1$) в режиме нагрузки трансформатора на сопротивление R_3 . Определите полосу пропускания трансформатора из условия уменьшения коэффициента передачи на границах в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с максимальным значением в области средних частот. Данные для расчета находятся в таблице в лаборатории.

4. Экспериментальная часть

Работа выполняется на блоке «Индуктивно связанные цепи». В качестве источника напряжения используется генератор

GFG-8219A, параметры его выходного напряжения заданы в таблице данных в лаборатории, форма сигнала — гармоническая.

4.1. Определение индуктивности катушек L_1 и L_2 .

4.1.1. Измерьте при помощи универсального вольтметра В7—77 сопротивление R_1 и активное сопротивление R_{L1} индуктивной катушки L_1 .

4.1.2. Подключите выход генератора к входу трансформатора (к элементам R_1, L_1). Выход трансформатора оставьте разомкнутым. Измерьте вольтметром В7—77 действующие значения напряжений U_{R1}, U_{L1} на элементах R_1 и L_1 . По падению напряжения на резисторе R_1 рассчитайте действующее значение тока, протекающего в цепи.

4.1.3. Используя результаты измерений и формулы, выведенные в п. 3.1 при подготовке к работе, рассчитайте индуктивность L_1 .

4.1.4. Повторите пункты 4.1.1—4.1.3 для измерения параметров катушки L_2 и сопротивления R_2 . Для определения индуктивности L_2 подключите генератор к элементам R_2, L_2 , измерьте напряжения U_{R2}, U_{L2} и далее рассчитайте L_2 аналогично п. 4.1.3.

4.2. Определение взаимной индуктивности M катушек L_1 и L_2 .

4.2.1. Включите катушки L_1 и L_2 встречно. Для этого соедините гнезда 1 и 2 (рис. 4.4).

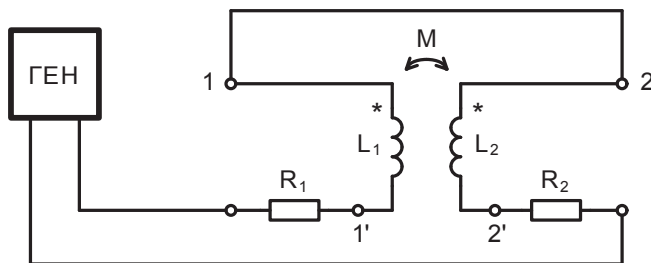


Рис. 4.4. Схема встречного включения катушек

4.2.2. Подключите выход генератора к последовательно соединенным элементам L_1, L_2 и R_1, R_2 (рис. 4.4), измерьте вольт-

тметром В7–77 напряжения на катушках $U_{1,2}$ (между зажимами 1', 2') и на резисторе R_1 — U_{R1} . По падению напряжения на резисторе R_1 определите ток, протекающий в цепи.

4.2.3. Используя результаты измерений и формулы, выведенные в п. 3.1 при подготовке к работе, рассчитайте взаимную индуктивность M между катушками L_1 и L_2 .

4.2.4. Повторите измерение взаимной индуктивности при согласном включении катушек. Для этого повторите пункты 4.2.1–4.2.3. Согласное включение создается путем соединения гнезд 1 и 2' (рис. 4.5). Напряжение на последовательно соединенных катушках $U_{1,2}$ измеряется между точками 1' и 2.

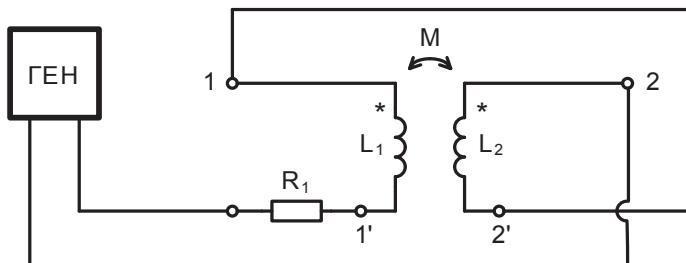


Рис. 4.5. Схема согласного включения катушек

4.3. Исследование трансформатора в режиме холостого хода.

4.3.1. Подключите выход генератора к входу трансформатора (к цепи R_1 , L_1 , рис. 4.1). Выходы трансформатора, элементы L_2 , R_2 (а также L_3) оставьте разомкнутыми.

Установите напряжение на входе трансформатора U_1 равным заданному (измеряйте вольтметром В7–77, сопротивление R_1 и R_2 считайте элементами трансформатора).

Измерьте напряжение на выходе трансформатора U_2 (рис. 4.1).

По падению напряжения на сопротивлении R_1 рассчитайте ток первичной обмотки трансформатора $I_{1\text{хх}}$.

По полученным данным рассчитайте коэффициент трансформации $n = U_2 / U_1$.

4.3.2. Повторите пункт 4.3.1 для обратного включения трансформатора, используя в качестве первичной обмотки катушку L_2 (с резистором R_2), а в качестве вторичной — L_1 .

4.4. Исследование трансформатора в режиме нагрузки. В качестве нагрузки используется сопротивление R_3 , которое подключается к выходу трансформатора — к цепи L_2, R_2 .

4.4.1. Подключите выход генератора к входу трансформатора (к цепи R_1, L_1). К выходу трансформатора (к цепи L_2, R_2) подключите сопротивление R_3 . Установите напряжение на входе трансформатора U_1 равным заданному (рис. 4.1, напряжение измеряйте вольтметром В7–77). Измерьте вольтметром В7–77 напряжение на выходе трансформатора U_2 (т. е. на сопротивлении нагрузки R_3). По падениям напряжения на сопротивлениях R_1 и R_2 рассчитайте токи первичной I_1 и вторичной I_2 обмоток. Рассчитайте коэффициент трансформации $n = U_2 / U_1$.

4.4.2. Снимите зависимость величины выходного напряжения U_2 от частоты входного напряжения (амплитудно-частотную характеристику трансформатора) в режиме нагрузки. Измерения проведите в диапазоне от 50 Гц до 200 кГц, изменяя частоту от измерения к измерению на октаву (в два раза), при этом контролируя и поддерживая на заданном уровне входное напряжение U_1 .

4.5. Исследование трансформатора при соединении вторичных обмоток L_2 и L_3 .

4.5.1. Соберите схему (рис. 4.6, а). Подключите выход генератора к входу трансформатора (к цепи R_1, L_1), установите напряжение на входе трансформатора U_1 равным заданному. Измерьте напряжения U_2, U_3, U_4 и ток первичной обмотки по падению напряжения U_{R1} на резисторе R_1 .

4.5.2. Соберите схему (рис. 4.6, б). Повторите измерения напряжений U_1, U_2, U_3, U_4 и тока первичной обмотки аналогично п. 4.5.1.

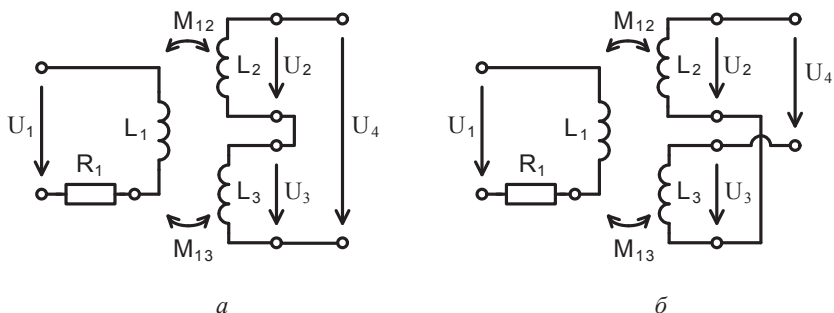


Рис. 4.6. Согласное (а) и встречное (б) соединение вторичных обмоток трансформатора

5. Обработка результатов

По результатам проведенных измерений рассчитайте параметры приведенной схемы замещения (рис. 4.2), определите действующие значения токов и напряжений на элементах.

Составьте таблицы сравнения результатов, полученных в ходе подготовки расчетным путем и измеренных при выполнении работы.

По результатам п. 4.4.2 рассчитайте и постройте амплитудно-частотную характеристику трансформатора (зависимость коэффициента передачи по напряжению $K_U(\omega) = U_2 / U_1$ от частоты).

Постройте векторные диаграммы токов и напряжений трансформатора (для приведенной схемы замещения) в режимах холостого хода и нагрузки. Для сравнения выберите одинаковые масштабы при построении векторных диаграмм по расчетным данным и по результатам эксперимента.

В выводах объясните полученные во всех пунктах задания экспериментальные результаты.

6. Требования к содержанию отчета

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- вывод расчетных формул со схемами измерения индуктивности катушек и взаимной индуктивности;
- приведенную схему замещения трансформатора;
- расчетную часть (исходные данные, расчетные формулы с пояснениями, результаты расчетов);
- схему лабораторного блока;
- результаты измерений;
- таблицу сравнения результатов, полученных расчетным и экспериментальным путем;
- векторные диаграммы токов и напряжений в режимах холостого хода и нагрузки, построенные по расчетным и экспериментальным данным;
- амплитудно-частотные характеристики, полученные расчетным и экспериментальным путем;
- выводы.

7. Контрольные вопросы

1. Что такое связанные катушки, связанные индуктивности?
2. В чем состоит явление взаимоиндукции?
3. Что такое потоки самоиндукции, взаимоиндукции и рассеяния?
4. Что означает согласное и встречное включение связанных катушек, как определить характер включения по одноименным зажимам?
5. Что такое сопротивление связи, коэффициент связи?
6. Чему равна индуктивность двух последовательно соединенных индуктивно связанных катушек?

7. Чему равна индуктивность двух параллельно соединенных индуктивно связанных катушек?
8. Как с помощью генератора гармонических колебаний и вольтметра определить индуктивность катушки? Взаимную индуктивность катушек?
9. Что такое линейный трансформатор? Какой трансформатор является линейным?
10. Какие существуют схемы замещения трансформатора? Какова цель и смысл использования схем замещения трансформатора?
11. Как изменяются выходное напряжение и ток первичной обмотки трансформатора в режиме нагрузки по сравнению с режимом холостого хода?
12. Чем определяются границы частотного диапазона, в котором может работать трансформатор?
13. Что такое идеальный трансформатор? Чем определяется коэффициент трансформации?
14. Как выбрать параметры идеального трансформатора для согласования источника сигнала с нагрузкой?

Лабораторная работа № 5

Частотные характеристики простейших электрических цепей

1. Цель работы

Расчет и экспериментальная проверка амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик линейных электрических цепей первого и второго порядка.

2. Основные теоретические положения

Комплексной частотной характеристикой (КЧХ) электрической цепи называется отношение комплексных изображений реакции и воздействия:

$$H_{kv}(j\omega) = \frac{\dot{Y}_{mk}}{\dot{X}_{mv}} = \frac{\dot{Y}_k}{\dot{X}_v},$$

где \dot{Y}_{mk} и \dot{Y}_k — комплексная амплитуда и комплексное действующее значение реакции цепи; \dot{X}_{mv} и \dot{X}_v — комплексная амплитуда и комплексное действующее значение воздействия; k — номер выходных зажимов; v — номер входных зажимов.

Размерность КЧХ равна отношению размерностей реакции и воздействия. В зависимости от того, какие величины (токи

или напряжения) рассматриваются в качестве реакции цепи и внешнего воздействия, КЧХ может иметь размерность сопротивления, проводимости или быть безразмерной. А в зависимости от того, на каких зажимах рассматриваются данные величины (на одних и тех же или на разных), КЧХ делятся на входные и передаточные (см. табл. 5.1).

Таблица 5.1

Виды комплексных частотных характеристик

Тип	Наименование	Обозначение	Воздействие	Реакция
входные	входное сопротивление	$Z_{vv}(j\omega)$	\dot{I}_v	\dot{U}_v
	входная проводимость	$Y_{vv}(j\omega)$	\dot{U}_v	\dot{I}_v
передаточные	коэффициент передачи по напряжению	$K_{kv}(j\omega)$ или $K_U(j\omega)$	\dot{U}_v	\dot{U}_k
	коэффициент передачи по току	$G_{kv}(j\omega)$ или $K_I(j\omega)$	\dot{I}_v	\dot{I}_k
	передаточное сопротивление	$Z_{kv}(j\omega)$	\dot{I}_v	\dot{U}_k
	передаточная проводимость	$Y_{kv}(j\omega)$	\dot{U}_v	\dot{I}_k

Зависимость модуля КЧХ от частоты $H_{kv}(\omega) = |H_{kv}(j\omega)|$ называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) цепи, а зависимость аргумента КЧХ от частоты $\varphi_{kv}(\omega) = \text{Arg } H_{kv}(j\omega)$ называется фазо-частотной характеристикой (ФЧХ).

При графическом представлении комплексных частотных характеристик цепи обычно строят отдельно АЧХ и ФЧХ. Однако КЧХ можно изобразить в виде одной зависимости — годографа или амплитудно-фазовой характеристики (АФХ) на комплексной плоскости. Годограф представляет собой геометрическое место концов вектора $H(j\omega)$, соответствующих изменению частоты от $\omega = 0$ до $\omega = \infty$.

Знание КЧХ позволяет определить реакцию цепи на заданное гармоническое воздействие $\dot{Y}_{mk} = H_{kv}(j\omega)\dot{X}_{mv}$ или $\dot{Y}_k = H_{kv}(j\omega)\dot{X}_v$.

При этом АЧХ представляет собой отношение амплитуд или действующих значений реакции и внешнего воздействия, а ФЧХ — разность начальных фаз реакции и воздействия.

КЧХ линейных цепей не зависят от амплитуды и начальной фазы внешнего воздействия, а определяются структурой цепи и параметрами входящих в нее элементов и могут быть рассчитаны по комплексной схеме замещения цепи с использованием известных методов расчета. Например, комплексный коэффициент передачи по напряжению последовательной цепи, состоящей из двух сопротивлений (рис. 5.1), может быть определен следующим образом.

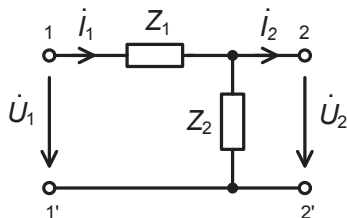


Рис. 5.1. Эквивалентная схема делителя напряжения

В режиме холостого хода, когда ток $\dot{I}_2 = 0$,

$$K_v(j\omega) = K_{21}(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{\dot{I}_1 Z_2}{\dot{U}_1} = \frac{[\dot{U}_1 / (Z_1 + Z_2)] Z_2}{\dot{U}_1} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}.$$

Если в качестве Z_1 используется сопротивление, а в качестве Z_2 емкость (рис. 5.2, а), то $Z_1 = R_3$, $Z_2 = 1/j\omega C_2$ и

$$K_v(j\omega) = \frac{1/j\omega C_2}{R_3 + 1/j\omega C_2} = \frac{1}{1 + j\omega C_2 R_3}.$$

Поскольку модуль отношения равен отношению модулей, а аргумент равен разности аргументов числителя и знаменателя, выражения для АЧХ и ФЧХ будут иметь вид:

$$K_U(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega C_2 R_3)^2}}, \quad \varphi_U(\omega) = -\arctg(\omega C_2 R_3).$$

На практике в качестве аргумента частотных характеристик удобнее использовать частоту $f = 1/T$, где T — период. Тогда $\omega = 2\pi f$.

Частотой среза цепи называется частота, при которой значение АЧХ уменьшается в определенное число раз от максимального значения. Как правило, частоту среза определяют по уровню $1/\sqrt{2} \approx 0,707$ (или -3 дБ в логарифмическом масштабе) от максимума. В данном случае максимум АЧХ наблюдается при $\omega = 0$, $K_U(0) = 1$, с ростом частоты АЧХ монотонно убывает, стремясь к нулю при $\omega = \infty$, и частота среза $\omega_{\text{ср}} = 1/C_2 R_3$ или $f_{\text{ср}} = 1/2\pi C_2 R_3$.

3. Расчетная часть

Данные для расчетов находятся в таблице в лаборатории.

3.1. Выведите формулы для комплексного коэффициента передачи по напряжению $K_U(j\omega) = K_{21}(j\omega)$ для цепей первого порядка, изображенных на рис. 5.2 и пренебрегая сопротивлением потерь катушки RL_1 .

3.2. Выведите формулы для АЧХ и ФЧХ указанных цепей.

3.3. По выведенным формулам рассчитайте и постройте графики АЧХ $K_U(f)$ и ФЧХ $\varphi_U(f)$ цепей первого порядка (RC , CR , RL , LR). Данные для расчета находятся в таблице в лаборатории. Расчет и построение графиков необходимо выполнять в линейном масштабе в диапазоне частот от f_{min} до f_{max} , соответствующим

щем изменению АЧХ от максимального значения K_{\max} до значения примерно $0,1K_{\max}$.

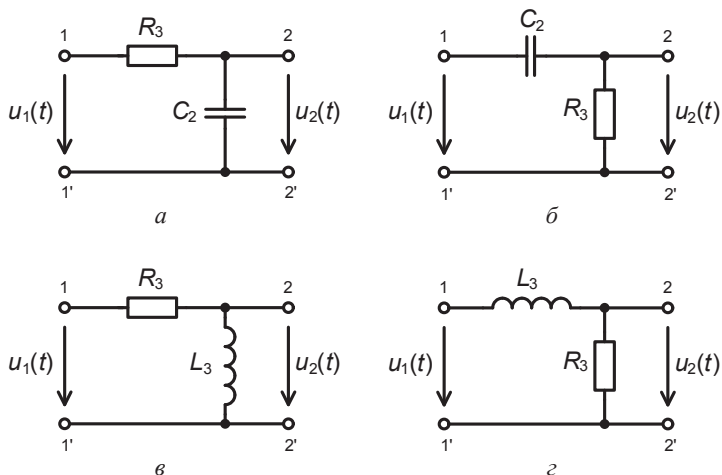


Рис. 5.2. Схемы исследуемых цепей первого порядка:

а) RC, б) CR, в) RL, г) LR

3.4. Рассчитайте и обозначьте на графиках значения частот среза $f_{\text{ср}}$.

3.5. Выведите формулу для комплексного коэффициента передачи по напряжению $K_U(j\omega) = K_{21}(j\omega)$ для цепи второго порядка, изображенной на рис. 5.3, пренебрегая сопротивлением потерь катушки.

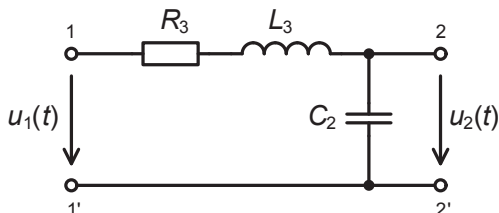


Рис. 5.3. Схема исследуемой цепи второго порядка

3.6. Выведите формулы для АЧХ и ФЧХ RLC цепи.

3.7. По выведенным формулам рассчитайте и постройте графики АЧХ $K_U(f)$ и ФЧХ $\varphi_U(f)$ RLC цепи. Расчет и построение графиков выполните для трех значений сопротивления R_3 : $R_3 = 2R_{кр}$, $R_3 = R_{кр}$ и $R_3 = 0,5R_{кр}$, где $R_{кр} = 2\sqrt{L_3/C_2}$. Графики необходимо построить в линейном масштабе в диапазоне частот от 0 до f_{max} , где f_{max} — частота, соответствующая значению АЧХ на уровне $0,1K_U(0)$, где $K_U(0)$ — значение АЧХ при $f = 0$.

3.8. По графикам определите значения частот среза $f_{ср}$ для каждого значения R_3 .

4. Экспериментальная часть

Работа выполняется на блоке «Простые и сложные цепи».

4.1. Исследование цепей первого порядка

4.1.1. При помощи универсального вольтметра В7–77 измерьте сопротивление потенциометра R_3 , установите его равным заданному значению; измерьте сопротивление потерь катушки R_{L3} , сравните его с табличным значением.

4.1.2. Соберите схему для измерения АЧХ и ФЧХ (рис. 5.4). В качестве исследуемой цепи подключите RC -цепь (рис. 5.2, а).

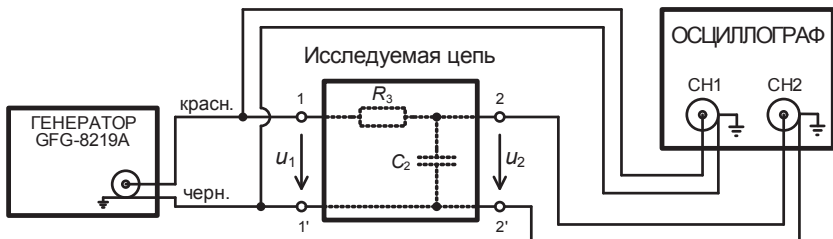


Рис. 5.4. Схема для измерения АЧХ и ФЧХ

4.1.3. После проверки схемы преподавателем включите питание приборов, установите на генераторе GFG-8219A параметры воздействия — гармонический сигнал, частота, близкая к значению, при котором наблюдается максимальное значение АЧХ K_{\max} (из расчетной части) для данной цепи.

4.1.4. Установите переключатели осциллографа OS-5020 в следующие положения: тип входа «AC/GND/DC» — «AC», режим работы «MODE» — «DUAL», режим синхронизации «MODE» — «AUTO», источник синхронизации «TRIGGER SOURCE» — «CH1». Убедитесь, что на экране осциллографа наблюдаются два гармонических сигнала с периодом, соответствующим частоте генератора.

4.1.5. Установите амплитуду сигнала на входе исследуемой цепи $U_{m1} = 5 \text{ В}$ (измеряйте осциллографом в канале 1). Изменяя частоту, определите диапазон частот $f_{\min} \dots f_{\max}$, в котором отношение амплитуд на выходе U_{m2} (канал 2) и на входе U_{m1} (канал 1) цепи изменяется от K_{\max} примерно до $0,1 K_{\max}$, сравните с диапазоном частот, полученным в расчетной части.

4.1.6. Изменяя частоту от f_{\min} до f_{\max} с равномерным шагом таким образом, чтобы выполнить 6–10 измерений, произведите измерения амплитуд на входе U_{m1} (канал 1) и на выходе U_{m2} (канал 2) цепи и временного сдвига t_3 между сигналами для каждого значения частоты. Если сигнал в канале 2 отстает от сигнала в канале 1, то t_3 необходимо брать со знаком «–», если опережает — со знаком «+». Результаты измерений занесите в таблицу.

Таблица 5.2

f , кГц	f_{\min}						f_{\max}
U_{m1} , В							
U_{m2} , В							
t_3 , мкс							
$K_U(f)$							
$\varphi_U(f)$, град							

4.1.7. Повторите пункты 4.1.2–4.1.6 для CR -цепи (рис. 5.2, б).

4.1.8. Повторите пункты 4.1.2–4.1.6 для RL -цепи (рис. 5.2, в).

4.1.9. Повторите пункты 4.1.2–4.1.6 для LR -цепи (рис. 5.2, г).

4.2. Исследование цепи второго порядка

4.2.1. При помощи универсального вольтметра В7–77 установите $R_3 = 2R_{кр}$ (см. п. 3.7). Измерение сопротивления проводите в разобранной схеме.

4.2.2. Соберите схему для измерения АЧХ и ФЧХ (рис. 5.4). В качестве исследуемой цепи подключите RLC -цепь (рис. 5.3).

4.2.3. После проверки схемы преподавателем включите питание приборов, установите на генераторе GFG-8219A параметры воздействия — гармонический сигнал, частота (0,5–1) кГц, переключатели осциллографа OS-5020 как написано в п. 4.1.4.

4.2.4. Установите амплитуду сигнала на входе исследуемой цепи $U_{m1} = 5$ В (измеряйте осциллографом в канале 1). Проверьте, что амплитуды сигналов на выходе U_{m2} (канал 2) и на входе U_{m1} (канал 1) цепи одинаковы, а временной сдвиг t_3 между сигналами равен нулю, в противном случае уменьшите частоту генератора. Изменяя частоту, найдите значение f_{max} , при котором отношение $U_{m2}/U_{m1} \approx 0,1$. Сравните результаты с расчетными данными.

4.2.5. Изменяя частоту от (0,5–1) кГц до f_{max} с равномерным шагом таким образом, чтобы выполнить 8–10 измерений, произведите измерения амплитуд на входе U_{m1} (канал 1) и на выходе U_{m2} (канал 2) цепи и временного сдвига t_3 между сигналами для каждого значения частоты. Результаты измерений занесите в таблицу, аналогичную п. 4.1.6.

4.2.6. Повторите пункты 4.2.2–4.2.5, установив $R_3 = R_{кр}$.

4.2.7. Повторите пункты 4.2.2–4.2.5, установив $R_3 = 0,5R_{кр}$.

5. Обработка результатов

5.1. По результатам измерений рассчитайте АЧХ $K_U(f) = U_{m2}/U_{m1}$ и ФЧХ $\varphi_U(f)$, рад $= 2\pi \cdot f \cdot t_3$ или $\varphi_U(f)$, град $= 360 \cdot f \cdot t_3$ исследуемых цепей, результаты занесите в таблицы (см. п. 4.1.6).

5.2. Постройте графики АЧХ и ФЧХ исследуемых цепей.

5.3. По экспериментальным графикам АЧХ определите частоты среза, составьте таблицу сравнения результатов расчета и эксперимента.

Таблица 5.3

$f_{ср}$, кГц	RC	CR	RL	LR	RLC		
					$2R_{кр}$	$R_{кр}$	$0,5R_{кр}$
расч.							
эксп.							

5.4. Сформулируйте выводы по проделанной работе.

6. Контрольные вопросы

1. Что такое комплексная частотная характеристика цепи? Какие существуют виды КЧХ? Как определяется размерность КЧХ?
2. Что такое амплитудно-частотная характеристика? Какой ее физический смысл?
3. Что такое фазо-частотная характеристика? Какой ее физический смысл?
4. Какими свойствами обладают КЧХ линейных цепей? Как рассчитать КЧХ цепи?
5. Как определить реакцию цепи на заданное гармоническое воздействие, если известна КЧХ?
6. Что такое частота среза?
7. Какой вид имеют КЧХ цепей, состоящих только из сопротивлений?

8. Какой вид имеют КЧХ цепей, содержащих один реактивный элемент (емкость или индуктивность)?
9. Какой вид имеют КЧХ цепей, содержащих различные реактивные элементы (емкость и индуктивность)?
10. От чего зависит вид КЧХ последовательной RLC -цепи и каким образом?

Лабораторная работа № 6

Резонансные явления в электрических цепях

1. Цель работы

Практическое знакомство с частотными характеристиками резонансных цепей. Экспериментальная проверка правильности соотношений, описывающих характеристики простого и сложного колебательных контуров.

2. Основные теоретические положения

В теории цепей используют следующее определение резонанса. Резонансом называют такой режим работы электрической цепи, содержащей емкости и индуктивности, при котором ее комплексное входное сопротивление (или проводимость) имеет чисто резистивный характер, и, следовательно, ток и напряжение на входе совпадают по фазе.

2.1. Последовательный колебательный контур

Простейшей электрической цепью, в которой наблюдается резонанс, является последовательный колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности и конденсатора, подключенных последовательно к источнику энергии (рис. 6.1). Сопротивление R_{π} учитывает потери энергии в контуре.

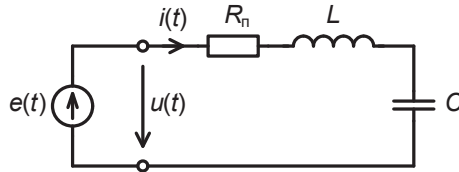


Рис. 6.1. Эквивалентная схема последовательного колебательного контура

Комплексное входное сопротивление последовательного контура

$$Z(j\omega) = R_n + j(\omega L - 1/\omega C), \quad (6.1)$$

откуда следует, что резонансная частота

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{или} \quad f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (6.2)$$

при этом $Z(j\omega_0) = R_n$.

Кроме резонансной частоты основными параметрами контура являются характеристическое сопротивление, равное полному сопротивлению индуктивности или емкости при резонансе:

$$\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (6.3)$$

и добротность

$$Q = \frac{\rho}{R_n}. \quad (6.4)$$

Если к контуру приложить напряжение с частотой, равной резонансной $u(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_U)$, то в контуре будет проте-

каль ток $i(t) = I_m \cos(\omega_0 t + \varphi_I)$. При этом амплитуда тока $I_m = \frac{U_m}{|Z(j\omega_0)|} = \frac{U_m}{R_{\Pi}}$, а начальная фаза $\varphi_I = \varphi_U - \arg Z(j\omega_0) = \varphi_U - 0 = \varphi_U$.

Любое отклонение частоты от резонансной приведет к появлению реактивной составляющей $Z(j\omega)$, увеличению полного сопротивления контура $|Z(j\omega)|$ и, следовательно, к уменьшению амплитуды тока I_m и отклонению начальной фазы φ_I от начальной фазы приложенного напряжения.

Амплитуды напряжений на реактивных элементах при резонансе $U_{mL} = U_{mC} = \rho \cdot I_m = \rho \cdot \frac{U_m}{R_{\Pi}} = Q \cdot U_m$. Поскольку добротность

$Q > 1$, то в последовательном контуре имеет место увеличение амплитуд напряжений на индуктивности и емкости, поэтому такой резонанс называется резонансом напряжений.

2.2. Параллельный колебательный контур

Другим примером электрической цепи, в которой имеют место резонансные явления, служит параллельный колебательный контур. В этом случае катушка индуктивности и конденсатор подключаются параллельно источнику. На практике обычно рассматривают эквивалентную схему, показанную на рис. 6.2, при этом все потери энергии в контуре относят к индуктивной ветви и учитывают в виде сопротивления R_L ($R_{\Pi} = R_L$).

Комплексное входное сопротивление параллельного контура

$$Z(j\omega) = \frac{(R_L + j\omega L)(1/j\omega C)}{R_L + j(\omega L - 1/\omega C)}. \quad (6.5)$$

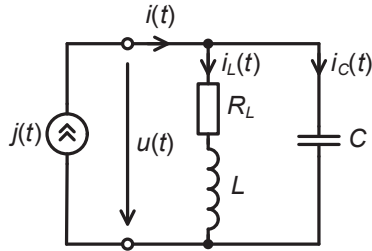


Рис. 6.2. Эквивалентная схема параллельного колебательного контура

Если рассматривать контур на относительно высоких частотах, считая $\omega L \gg R_L$, то

$$Z(j\omega) \approx \frac{\rho^2}{R_L + j(\omega L - 1/\omega C)}, \quad (6.6)$$

где ρ — характеристическое сопротивление (6.3), и на резонансной частоте $\omega_p \approx \omega_0$, см. формулу (6.2),

$$Z(j\omega_p) \approx Z(j\omega_0) = R_{oe} = \frac{\rho^2}{R_L} = \rho Q, \quad (6.7)$$

где $Q = \rho/R_L$ — добротность. Величина R_{oe} называется резонансным сопротивлением контура.

Если к контуру подвести ток с частотой, равной резонансной $i(t) = I_m \cos(\omega_p t + \varphi_I)$, то напряжение на контуре будет изменяться по закону $u(t) = U_m \cos(\omega_p t + \varphi_U)$, где $U_m = R_{oe} I_m$, а $\varphi_U = \varphi_I$. А амплитуды токов в ветвях контура $I_{mL} \approx I_{mC} \approx \frac{U_m}{\rho} = \frac{R_{oe} I_m}{\rho} = Q \cdot I_m$.

Таким образом, в параллельном колебательном контуре имеет место увеличение амплитуд токов в индуктивности и емкости на резонансной частоте в Q раз (резонанс токов).

Для описания частотных характеристик колебательных контуров (6.1), (6.6) вводится определение обобщенной расстройки

$$\xi = \frac{\omega L - 1/\omega C}{R_L} = Q \left(\frac{\omega}{\omega_p} - \frac{\omega_p}{\omega} \right) = Q \left(\frac{f}{f_p} - \frac{f_p}{f} \right). \quad (6.8)$$

И тогда зависимость комплексного входного сопротивления контура от частоты (6.6) описывается выражением:

$$Z(j2\pi f) = \frac{\rho^2}{R_L(1+j\xi)} = \frac{R_{oe}}{1+j\xi}. \quad (6.9)$$

АЧХ и ФЧХ соответственно будут равны:

$$Z(f) = \frac{R_{oe}}{\sqrt{1+\xi^2}} \text{ и } \varphi_z(f) = -\arctg(\xi). \quad (6.10)$$

Для сравнения колебательных контуров с различными параметрами удобнее пользоваться нормированными АЧХ

$$\bar{Z}(f) = \frac{Z(f)}{Z(f_p)} = \frac{Z(f)}{R_{oe}} = \frac{1}{\sqrt{1+\xi^2}}. \quad (6.11)$$

На рис. 6.3 показана нормированная АЧХ параллельного колебательного контура.

Полное сопротивление контура, т. е. АЧХ, существенно зависит от частоты. Если подать на такой контур сумму гармонических токов с различными частотами и одинаковыми ампли-

тудами, то на контуре выделятся токи с частотами, лежащими в окрестности резонансной частоты f_p , поскольку сопротивление контура для них будет велико и близко к $R_{\text{ое}}$. Для токов с частотами, далеко отстоящими от f_p , сопротивление контура будет мало, и они пройдут через контур со значительным ослаблением. Такое свойство электрических цепей — выделять одни сигналы среди других — называется избирательностью.

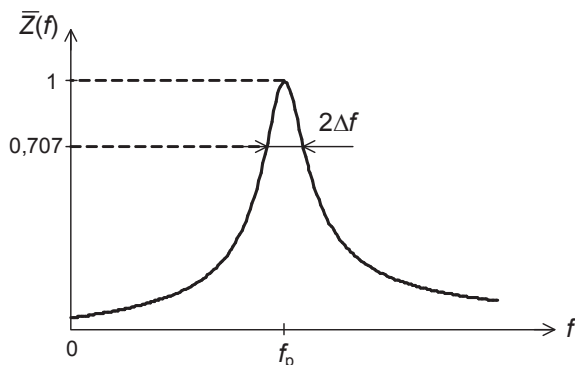


Рис. 6.3. Нормированная АЧХ параллельного колебательного контура

Диапазон частот, на границах которого полное сопротивление контура изменяется в $\sqrt{2} \approx 0,707$ раз от максимального значения, называется полосой пропускания:

$$2\Delta f = \frac{f_p}{Q}. \quad (6.12)$$

Отсюда видно, что чем выше добротность Q , тем меньше полоса пропускания $2\Delta f$ и тем лучше избирательные свойства контура.

В радиотехнических устройствах колебательный контур входит в состав более сложных цепей, при этом параллельно с ним включается некоторое сопротивление нагрузки R_n (рис. 6.4), ко-

торым может быть, например, выходное сопротивление источника или входное сопротивление следующего каскада.

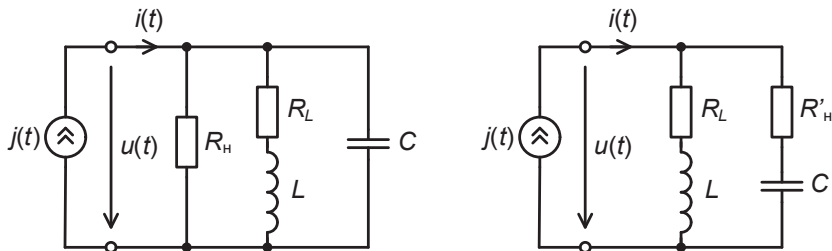


Рис. 6.4. Эквивалентная схема параллельного контура, зашунтированного сопротивлением R_n

В этом случае, преобразуя параллельное соединение элементов R_n и C в последовательное, рассматривая диапазон частот, близких к резонансной ($1/\omega C \approx 1/\omega_0 C = \rho$), и допуская $R_n \gg \rho$, получаем, что в контур вносится дополнительное сопротивление потерь $R'_n \approx \rho^2/R_n$. В этом случае эквивалентная добротность получается равной

$$Q_3 = \frac{\rho}{R_L + R'_n} = \frac{Q}{1 + R_{oc}/R_n}. \quad (6.13)$$

Остальные параметры также меняются на эквивалентные:

$$2\Delta f_3 = \frac{f_p}{Q_3}, \quad R_{oc3} = \rho Q_3. \quad (6.14)$$

Таким образом, сопротивление R_n приводит к снижению добротности контура ($Q_3 < Q$) и расширению полосы пропускания ($2\Delta f_3 > 2\Delta f$), т. е. к ухудшению его избирательных свойств.

2.3. Сложный колебательный контур

Сложный колебательный контур или контур с частичным включением реактивного элемента позволяет уменьшить влияние R_n на избирательные свойства за счет меньшего резонансного сопротивления R_{0c} . Кроме того, такой контур обладает свойством трансформации сопротивлений, что позволяет использовать его для согласования источника с нагрузкой. На рис. 6.5 показана эквивалентная схема колебательного контура с частичным включением индуктивности.

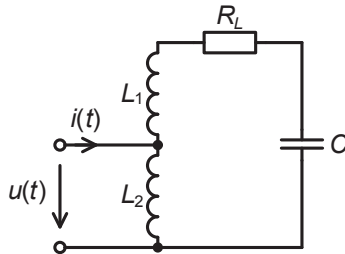


Рис. 6.5. Эквивалентная схема контура с частичным включением индуктивности

Частичное включение реактивного элемента учитывается с помощью коэффициента включения p , который равен отношению амплитуды напряжения на зажимах, которыми контур включается во внешнюю цепь, к амплитуде напряжения на всем контуре. В случае частичного включения индуктивности, если L_1 и L_2 являются отдельными катушками (рис. 6.5), коэффициент включения

$$p = \frac{L_2}{L_1 + L_2} = \frac{L_2}{L}, \quad (6.15)$$

где $L = L_1 + L_2$ — общая индуктивность контура.

Основным резонансом в сложном контуре является резонанс токов, частота которого

$$\omega_p \approx \omega_{0T} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{(L_1 + L_2)C}}. \quad (6.16)$$

В окрестности частоты резонанса токов сложный контур ведет себя аналогично простому параллельному колебательному контуру, но его резонансное сопротивление

$$R_{oe} = p^2 \rho Q. \quad (6.17)$$

Как правило, на практике частичное включение индуктивности реализуется путем выполнения отвода от катушки колебательного контура, в этом случае формула для коэффициента включения усложняется (см. расчетную часть), а простой и сложный контуры имеют одинаковые резонансную частоту ω_p (f_p), характеристическое сопротивление ρ , добротность Q и отличаются только резонансным сопротивлением R_{oe} и эквивалентными параметрами — Q_3 , $2\Delta f_3$, R_{oe3} .

Особенностью частотной характеристики (рис. 6.6) сложного контура является резонанс напряжений в последовательной

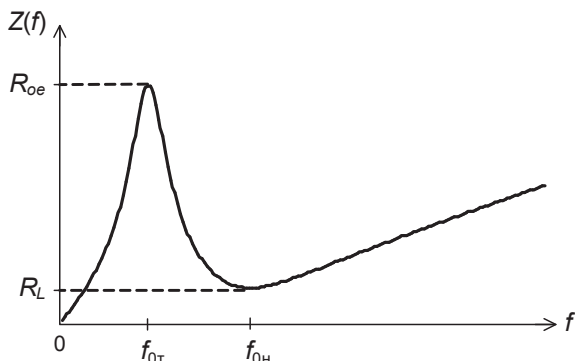


Рис. 6.6. АЧХ контура с частичным включением индуктивности

ветви $L_1 C$ (рис. 6.5), частота которого $\omega_{0н} = 1/\sqrt{L_1 C}$. В окрестности этой частоты сложный контур ведет себя аналогично последовательному колебательному контуру.

3. Расчетная часть

Данные для расчетов (резонансная частота f_p , индуктивности L_1, L_1', L_1'' , сопротивление потерь R_{L1} и величины сопротивлений $R_i, R_{ш}$) находятся в таблице в лаборатории.

3.1. Для простого параллельного незашунтированного колебательного контура (рис. 6.7) рассчитайте:

- характеристическое сопротивление ρ ,
- добротность Q ,
- резонансное сопротивление $R_{0е}$,
- полосу пропускания $2\Delta f$.

3.2. Определите $Q_э$, $R_{0э}$, $2\Delta f_э$ для случаев, когда контур зашунтирован:

- сопротивлением источника тока R_i ,
- одновременно сопротивлением источника тока R_i и шунтом $R_{ш}$.

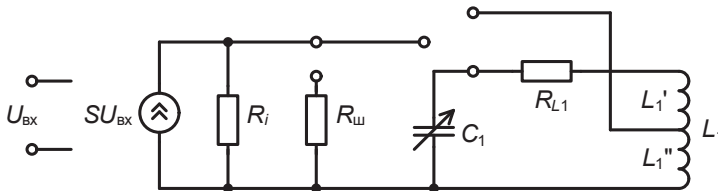


Рис. 6.7. Эквивалентная схема измерительной установки

3.3. Рассчитайте нормированную зависимость модуля входного сопротивления простого параллельного колебательного контура $\bar{Z}(f)$ от частоты f (АЧХ), см. формулы (6.8), (6.11), для случаев, когда контур зашунтирован:

- сопротивлением R_i ,
- одновременно сопротивлениями R_i и $R_{ш}$.

Постройте графики нормированных АЧХ $\bar{Z}(f)$.

Расчет и построение графиков нормированных АЧХ проведите в интервале частот от f_{\min} до f_{\max} , которые находятся из условия:

$$Z(f_{\min}) \approx Z(f_{\max}) \approx 0,2Z(f_p).$$

Графики постройте на одном рисунке.

3.4. Повторите пп. 3.1–3.3 для сложного контура с двумя индуктивностями L_1' и L_1'' (рис. 6.7). При расчете коэффициента включения p учтите, что L_1' и L_1'' являются частями одной катушки L_1 и поэтому между ними существует взаимная индуктивность M . Таким образом, $L_1 = L_1' + L_1'' + 2M$, $p = \frac{L_1'' + M}{L_1}$.

Расчет и построение АЧХ сложного контура произведите для частот вблизи частоты параллельного резонанса (резонанса токов) f_p . Диапазон частот выбирается аналогично п. 3.3.

3.5. Изучите методику измерения АЧХ и порядок выполнения работы. Ответьте на контрольные вопросы п. 7.

4. Методика измерения АЧХ

Данная работа выполняется на блоке «Избирательные цепи» лабораторного стенда. Колебательный контур является нагрузкой резонансного усилителя. Если в цепи действуют только гармонические токи и напряжения, то усилительный элемент можно представить как источник тока, управляемый напряжением (рис. 6.7), ток которого $I = S \cdot U_{\text{вх}}$, где $U_{\text{вх}}$ — входное напряжение усилителя, S — крутизна вольт-амперной характеристики усилительного элемента.

Внутреннее сопротивление источника R_i равно выходному сопротивлению усилительного элемента.

Пользуясь эквивалентной схемой (рис. 6.7), напряжение на контуре можно записать следующим образом:

$$U_{\kappa}(f) = I \cdot Z(f) = S \cdot U_{\text{вх}} \cdot Z(f), \quad (6.18)$$

где $Z(f)$ — модуль входного сопротивления контура, зависящий от частоты входного воздействия f . При этом сопротивление R_i (или R_i и $R_{\text{ш}}$), подключенное параллельно контуру, пересчитывается последовательно в контур (рис. 6.4), что приводит к уменьшению эквивалентной добротности и изменению эквивалентных параметров согласно формулам (6.13), (6.14).

На резонансной частоте

$$U_{\kappa}(f_p) = S \cdot U_{\text{вх}} \cdot Z(f_p). \quad (6.19)$$

Если действующее значение входного напряжения $U_{\text{вх}}$ постоянно, то нормированная зависимость напряжения на контуре от частоты описывается выражением:

$$\bar{U}_{\kappa}(f) = \frac{U_{\kappa}(f)}{U_{\kappa}(f_p)} = \frac{S \cdot U_{\text{вх}} \cdot Z(f)}{S \cdot U_{\text{вх}} \cdot Z(f_p)} = \frac{Z(f)}{Z(f_p)} = \bar{Z}(f), \quad (6.20)$$

т. е. совпадает с нормированной АЧХ входного сопротивления.

Полученное соотношение определяет методику измерения АЧХ:

- на вход резонансного усилителя необходимо подать гармоническое колебание от генератора (рис. 6.8);
- измерить амплитуду (или действующее значение) напряжения на контуре на резонансной частоте $U_{\kappa}(f_p)$;

- измерить амплитуду (или действующее значение) напряжения на контуре $U_k(f_i)$ на частотах f_i необходимое число раз в заданном диапазоне, при этом амплитуду входного сигнала $U_{вх}$ необходимо поддерживать постоянной;
- произвести расчет нормированной АЧХ по формуле (6.20).

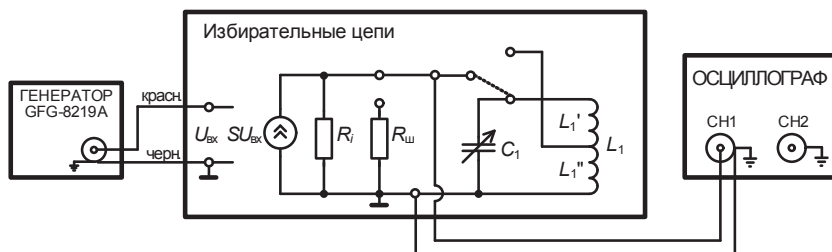


Рис. 6.8. Схема установки для измерения АЧХ

5. Экспериментальная часть

Работа выполняется на блоке «Избирательные цепи»

5.1. Исследование простого параллельного колебательно-го контура

5.1.1. Соберите схему для измерения АЧХ (рис. 6.8).

К источнику тока блока «Избирательные цепи» подключите нагрузку в виде простого параллельного колебательного контура.

Включите питание измерительных приборов и лабораторного стенда.

5.1.2. На генераторе GFG-8219A выберите гармонический сигнал, установите частоту равной заданной резонансной частоте контура f_p , а амплитуду 0,4–0,6 В (измеряйте осциллографом). Изменяя емкость C_1 , настройте контур в резонанс по максимуму напряжения на контуре.

Примечание. Напряжение на контуре должно быть гармоническим. Если его вид искажается при настройке, необходи-

мо уменьшить амплитуду сигнала генератора. Измерьте период колебаний, убедитесь, что он соответствует частоте входного сигнала.

5.1.3. Измерьте амплитуду напряжения на контуре на резонансной частоте $U_k(f_p)$.

5.1.4. Измерьте амплитуды напряжения на контуре $U_k(f)$ в интервале частот от f_{\min} до f_{\max} , которые определяются из условия $U_k(f_{\min}) \approx U_k(f_{\max}) \approx 0,2U_k(f_p)$.

Примечание 1. При измерении АЧХ частоту генератора необходимо менять так, чтобы изменение напряжения происходило с равномерным шагом. Т.е. необходимо провести измерения на частотах, соответствующих напряжениям $0,9U_k(f_p)$, $0,8U_k(f_p)$, $0,7U_k(f_p)$ и т.д. до $0,2U_k(f_p)$ при изменении частоты в обе стороны от резонансной.

Примечание 2. Измерение АЧХ удобно выполнять следующим образом. Изменяя масштаб по оси Y осциллографа с помощью ручки плавной регулировки, добейтесь, чтобы напряжение на контуре при резонансе занимало весь экран осциллографа, т.е. 8 делений, таким образом, удвоенная амплитуда $2U_k(f_p) = 8 \text{ делений} \cdot \text{Масштаб}$. После этого масштаб не меняйте. Тогда на частоте f будет: $2U_k(f) = N \text{ делений} \cdot \text{Масштаб}$. И нормированная АЧХ контура получается равной

$$\bar{Z}(f) = \bar{U}_k(f) = \frac{U_k(f)}{U_k(f_p)} = \frac{2U_k(f)}{2U_k(f_p)} = \frac{N \text{ делений}(f)}{8 \text{ делений}}. \quad (6.21)$$

Таким образом, отсчет уровней $0,9U_k(f_p)$, $0,8U_k(f_p)$, $0,7U_k(f_p)$ и т.д. можно производить не от абсолютного значения амплитуды $U_k(f_p)$ в вольтах, а от полной шкалы экрана осциллографа, т.е. от 8 делений (в этом случае отсчитывается удвоенная амплитуда).

После всех измерений верните ручку плавной регулировки масштаба в крайнее правое положение.

5.1.5. Подключите параллельно контуру сопротивление шунта $R_{\text{ш}}$, повторите измерение АЧХ по пп. 5.1.2–5.1.4.

5.2. Исследование сложного колебательного контура

5.2.1. Подключите к источнику тока нагрузку в виде сложного колебательного контура. Сопротивление $R_{\text{ш}}$ отключите. Изменяя емкость C_1 , выполните подстройку контура в резонанс по максимуму напряжения на контуре.

Примечание. При переходе от простого контура к сложному резонансная частота может сместиться. Это обусловлено влиянием паразитной емкости кабеля осциллографа, которая включается в контур.

5.2.2. Измерьте АЧХ сложного контура аналогично пп. 5.1.2–5.1.4.

5.2.3. Подключите параллельно сложному контуру сопротивление шунта $R_{\text{ш}}$, повторите измерение АЧХ по пп. 5.1.2–5.1.4.

6. Обработка результатов

6.1. По результатам измерений рассчитайте нормированные АЧХ контуров $\bar{Z}(f)$ по формуле (6.21). Постройте графики нормированных АЧХ: на одном рисунке — АЧХ простого контура без шунта и с шунтом $R_{\text{ш}}$, на другом — АЧХ сложного контура без шунта и с шунтом. Определите полосы пропускания $2\Delta f$ и добротности Q контуров.

6.2. Составьте таблицу сравнения параметров контуров.

Таблица 6.1

		Простой		Сложный	
		$2\Delta f$, кГц	Q	$2\Delta f$, кГц	Q
Без $R_{\text{ш}}$	расч.				
	эксп.				
С $R_{\text{ш}}$	расч.				
	эксп.				

6.3. Сформулируйте выводы по проделанной работе.

7. Контрольные вопросы

1. Сформулируйте определение резонанса. В каких цепях имеют место резонансные явления? Что такое резонанс напряжений, резонанс токов?
2. Изобразите эквивалентные схемы последовательного и параллельного колебательных контуров. Назовите их основные параметры.
3. Постройте векторные диаграммы токов и напряжений простого параллельного контура для случаев: а) $f = f_p$; б) $f > f_p$; в) $f < f_p$.
4. Постройте семейство АЧХ параллельного колебательного контура, подключенного к источнику тока, внутреннее сопротивление которого принимает значения R_{i1}, R_{i2}, R_{i3} ($R_{i1} > R_{i2} > R_{i3}$).
5. Как изменится АЧХ простого параллельного колебательного контура при изменении сопротивления потерь R_n от 0 до $2\sqrt{L/C}$?
6. Постройте семейство фазо-частотных характеристик простого параллельного контура для трех значений добротности $Q_1 > Q_2 > Q_3$.
7. На какие параметры и каким образом влияет резистивная нагрузка в простом параллельном и в сложном контурах?
8. В чем состоит отличие АЧХ простого и сложного колебательных контуров с одинаковыми добротностями и резонансными сопротивлениями при больших и малых расстройках?
9. Сложный контур с двумя индуктивностями подключен к источнику тока с внутренним сопротивлением R_i . Как зависят от коэффициента включения: а) частота резонанса токов; б) эквивалентное резонансное сопротивление; в) эквивалентная полоса пропускания?
10. Как экспериментально определить добротность параллельного колебательного контура?

Лабораторная работа № 7

Исследование пассивного четырехполюсника

1. Цель работы

Практическое использование основных положений теории четырехполюсников. Экспериментальное определение A и $Y(Z)$ параметров, составление схемы замещения пассивного четырехполюсника, исследование его частотных характеристик.

2. Основные теоретические положения

Четырехполюсником (многополюсником) называется электрическая цепь, имеющая две (или более) пары внешних зажимов. Такое представление цепи (устройства, системы) позволяет описать и рассчитать основные характеристики, устанавливающие связь напряжений и токов на внешних зажимах без детального рассмотрения процессов в элементах, составляющих цепь (сопротивлениях, емкостях, индуктивностях и др.). Для этого достаточно определить параметры четырехполюсника (многополюсника). Четырехполюсник (рис. 7.1) характеризуется двумя парами напряжений \dot{U}_1 , \dot{U}_2 и токов \dot{I}_1 , \dot{I}_2 соответственно на входных 1–1' и выходных 2–2'' зажимах. Две из этих четырех величин могут быть заданы независимо, тогда две другие находятся из системы уравнений в той или иной форме параметров.

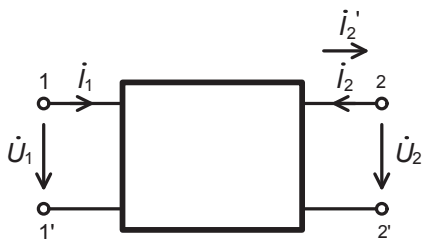


Рис. 7.1. Четырехполюсник

В зависимости от того, какая пара величин считается заданной, а какая искомой, возможны шесть вариантов систем уравнений, например уравнения в форме Y -параметров:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = Y_{11} \cdot \dot{U}_1 + Y_{12} \cdot \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 = Y_{21} \cdot \dot{U}_1 + Y_{22} \cdot \dot{U}_2 \end{cases} \quad (7.1)$$

В форме Z -параметров:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = Z_{11} \cdot \dot{I}_1 + Z_{12} \cdot \dot{I}_2 \\ \dot{U}_2 = Z_{21} \cdot \dot{I}_1 + Z_{22} \cdot \dot{I}_2 \end{cases} \quad (7.2)$$

В форме A -параметров:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = A_{11} \cdot \dot{U}_2 + A_{12} \cdot \dot{I}_2' \\ \dot{I}_1 = A_{21} \cdot \dot{U}_2 + A_{22} \cdot \dot{I}_2' \end{cases} \quad (7.3)$$

Для каждой системы уравнений условно-положительные направления токов и напряжений выбираются, как показано на рис. 7.1. В уравнениях в форме A -параметров направление тока \dot{I}_2 меняется на противоположное — \dot{I}_2' .

Коэффициенты, входящие в системы уравнений (7.1)–(7.3) называются первичными параметрами, они полностью и однозначно описывают четырехполюсник в любом режиме работы.

Первичные параметры имеют определенный физический смысл и могут быть определены, если известна внутренняя структура четырехполюсника. Например, исходя из системы уравнений (7.1) Y -параметры имеют следующий физический смысл:

$$Y_{11} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1} \right|_{\dot{U}_2=0} \quad \text{— входная проводимость со стороны зажимов } 1-1' \text{ при коротком замыкании (КЗ) на зажимах } 2-2';$$

$$Y_{21} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1} \right|_{\dot{U}_2=0} \quad \text{— передаточная проводимость при КЗ на зажимах } 2-2';$$

$$Y_{12} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{U}_1=0} \quad \text{— передаточная проводимость при КЗ на зажимах } 1-1';$$

$$Y_{22} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{U}_1=0} \quad \text{— входная проводимость со стороны зажимов } 2-2' \text{ при КЗ на зажимах } 1-1'.$$

Параметры Z_{11} , Z_{22} , Z_{12} , Z_{21} в уравнениях (7.2) имеют смысл входных и передаточных сопротивлений в режимах холостого хода (ХХ) на зажимах 2–2' либо 1–1'. Аналогично можно определить физический смысл A -параметров в системе (7.3), например $A_{11} = \dot{U}_1 / \dot{U}_2$ при $\dot{I}_2' = 0$, т. е. представляет собой величину, обратную комплексному коэффициенту передачи по напряжению $K_U(j\omega)$ в режиме ХХ на выходе.

Первичные параметры четырехполюсника, если известна его внутренняя структура, можно определить путем составления

уравнений электрического равновесия и приведением их к той или иной форме параметров. На рис. 7.2 показан П-образный четырехполюсник, состоящий из проводимостей Y_1 , Y_2 , Y_3 .

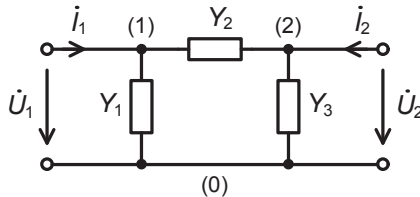


Рис. 7.2. П-образный четырехполюсник

Если записать уравнения по методу узловых напряжений для узлов (1) и (2), получим:

$$\begin{cases} (Y_1 + Y_2) \cdot \dot{U}_1 + (-Y_2) \cdot \dot{U}_2 = \dot{I}_1 \\ (-Y_2) \cdot \dot{U}_1 + (Y_2 + Y_3) \cdot \dot{U}_2 = \dot{I}_2 \end{cases}$$

Сравнивая полученные уравнения с системой (7.1), можно легко определить Y -параметры П-образного четырехполюсника:

$$Y_{11} = Y_1 + Y_2, \quad Y_{22} = Y_2 + Y_3, \quad Y_{12} = Y_{21} = -Y_2. \quad (7.4)$$

Аналогичным образом можно найти Z -параметры Т-образного четырехполюсника (рис. 7.3), если записать для него уравнения электрического равновесия по методу контурных токов.

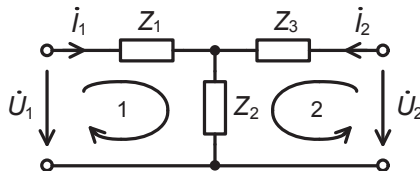


Рис. 7.3 Т-образный четырехполюсник

$$\begin{cases} (Z_1 + Z_2) \cdot \dot{I}_1 + Z_2 \cdot \dot{I}_2 = \dot{U}_1 \\ Z_2 \cdot \dot{I}_1 + (Z_2 + Z_3) \cdot \dot{I}_2 = \dot{U}_2 \end{cases}.$$

Сравнивая полученные уравнения с системой (7.2), находим Z -параметры:

$$Z_{11} = Z_1 + Z_2, \quad Z_{22} = Z_2 + Z_3, \quad Z_{12} = Z_{21} = Z_2. \quad (7.5)$$

Первичные параметры четырехполюсника, входящие в разные системы уравнений (7.1)–(7.3), однозначно пересчитываются одни в другие путем преобразования уравнений к требуемому виду. Например, уравнения (7.1), (7.2) могут быть решены относительно входных напряжения \dot{U}_1 и тока \dot{I}_1 , тогда A -параметры можно выразить через Y либо через Z -параметры. Формулы перехода от одной системы параметров к другой приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Соотношения между первичными параметрами четырехполюсника

	Y	Z	A
Y	$\begin{matrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{matrix}$	$\begin{matrix} Z_{22} / \Delta Z & -Z_{12} / \Delta Z \\ -Z_{21} / \Delta Z & Z_{11} / \Delta Z \end{matrix}$	$\begin{matrix} A_{22} / A_{12} & -\Delta A / A_{12} \\ -1 / A_{12} & A_{11} / A_{12} \end{matrix}$
Z	$\begin{matrix} Y_{22} / \Delta Y & -Y_{12} / \Delta Y \\ -Y_{21} / \Delta Y & Y_{11} / \Delta Y \end{matrix}$	$\begin{matrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{matrix}$	$\begin{matrix} A_{11} / A_{21} & \Delta A / A_{21} \\ 1 / A_{21} & A_{22} / A_{21} \end{matrix}$
A	$\begin{matrix} -Y_{22} / Y_{21} & -1 / Y_{21} \\ -\Delta Y / Y_{21} & -Y_{11} / Y_{21} \end{matrix}$	$\begin{matrix} Z_{11} / Z_{21} & \Delta Z / Z_{21} \\ 1 / Z_{21} & Z_{22} / Z_{21} \end{matrix}$	$\begin{matrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{matrix}$

Здесь Δ — определитель соответствующей матрицы, например $\Delta Y = Y_{11} \cdot Y_{22} - Y_{12} \cdot Y_{21}$.

Четырехполюсник называется взаимным (обратимым), если он удовлетворяет теореме взаимности (обратимости) [3]. Тако-

вым является любой четырехполюсник, составленный из линейных пассивных элементов. Для взаимного четырехполюсника только три из четырех первичных параметров являются независимыми. Матрицы Y , Z и A -параметров такого четырехполюсника обладают свойствами:

$$Y_{12} = Y_{21}, \quad Z_{12} = Z_{21}, \quad \Delta A = A_{11} \cdot A_{22} - A_{12} \cdot A_{21} = 1. \quad (7.6)$$

В реальных задачах первичные параметры чаще всего определяются экспериментально. Однако непосредственное экспериментальное определение их является достаточно сложным. Для взаимных (обратимых) линейных четырехполюсников первичные параметры могут быть рассчитаны через сопротивления холостого хода и короткого замыкания — Z_{1XX} , Z_{1K3} , Z_{2XX} , Z_{2K3} , определенные соответственно со стороны зажимов 1–1' и 2–2' при XX или КЗ на противоположной стороне зажимов. Данные параметры XX и КЗ непосредственно связаны с некоторыми первичными параметрами:

$$Z_{1K3} = 1/Y_{11}, \quad Z_{1XX} = Z_{11}, \quad Z_{2K3} = 1/Y_{22}, \quad Z_{2XX} = Z_{22}, \quad (7.7)$$

и обладают свойством:

$$\frac{Z_{1K3}}{Z_{1XX}} = \frac{Z_{2K3}}{Z_{2XX}}. \quad (7.8)$$

Используя табл. 7.1, параметры XX и КЗ можно выразить через любую систему первичных параметров, и наоборот, первичные параметры взаимного линейного четырехполюсника можно выразить через параметры XX и КЗ. Например, A -параметры:

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= \sqrt{\frac{Z_{1XX}}{Z_{2XX} - Z_{2K3}}}; & A_{12} &= A_{11} \cdot Z_{2K3}; \\
 A_{21} &= \frac{A_{11}}{Z_{1XX}}; & A_{22} &= A_{11} \cdot \frac{Z_{2XX}}{Z_{1XX}}.
 \end{aligned}
 \tag{7.9}$$

Иногда возникает задача восстановить внутреннюю структуру четырехполюсника, зная первичные параметры. Для этого чаще всего используют П-образную (рис. 7.2) и Т-образную (рис. 7.3) схемы замещения. Если известны Y -параметры четырехполюсника, то, используя выражения (7.4), можно найти проводимости П-образной схемы замещения (рис. 7.2):

$$Y_1 = Y_{11} + Y_{12}, \quad Y_2 = -Y_{12}, \quad Y_3 = Y_{22} + Y_{12},$$

и определить, из каких элементов (сопротивлений, индуктивностей, емкостей) состоит каждая ветвь. Используя выражения (7.5), можно найти сопротивления Т-образной схемы замещения (рис. 7.3), зная Z -параметры четырехполюсника:

$$Z_1 = Z_{11} - Z_{12}, \quad Z_2 = Z_{12}, \quad Z_3 = Z_{22} - Z_{12}.$$

Данные выражения и схемы замещения справедливы для пассивных линейных четырехполюсников.

3. Расчетная часть

Данные для расчетов — тип четырехполюсника П-образный (I) или Т-образный (II), параметры элементов, частота f_1 находятся в таблице в лаборатории.

3.1. Выведите формулы для первичных параметров заданного четырехполюсника. Для П-образного (I) четырехполюсника

ка необходимо рассчитать Y и A -параметры, а для Т-образного (II) Z и A -параметры.

3.2. Рассчитайте значения первичных параметров на частоте f_1 .

3.3. Выведите формулу для комплексного коэффициента передачи четырехполосника по напряжению $K_U(j\omega)$ в режиме холостого хода, используя соотношение:

$$K_U(j\omega) = \frac{1}{A_{11}}. \quad (7.10)$$

3.4. Рассчитайте и постройте графики АЧХ и ФЧХ коэффициента передачи по напряжению в режиме холостого хода. Расчет и построение графиков выполните в диапазоне частот от 0 до $10f_1$.

3.5. Изучите методику проведения эксперимента. Ответьте на контрольные вопросы п. 6.

4. Экспериментальная часть

Работа выполняется на блоке «Четырехполосники» лабораторного стенда. П-образный (I) четырехполосник расположен в верхней части блока, Т-образный (II) — в нижней. Сопротивления R_1 , R_2 (R_3 , R_4) величиной 100 Ом, включенные последовательно со входом и выходом четырехполосника используются для измерения токов, протекающих через зажимы четырехполосника.

4.1. С помощью универсального вольтметра В7–77 измерьте величины сопротивлений R_1 , R_2 (R_3 , R_4).

4.2. Соберите схему для измерения входных сопротивлений $Z_{\text{вх}}$ и $Z_{\text{кз}}$ (рис. 7.4). После проверки схемы преподавателем включите питание приборов. Установите на генераторе

GFG-8219A параметры воздействия — гармонический сигнал с частотой, равной заданному значению f_1 . Установите переключатели осциллографа OS-5020 в следующие положения: режим работы «MODE» — «DUAL», режим синхронизации «MODE» — «AUTO», источник синхронизации «TRIGGER SOURCE» — «CH1». Изменяя выходное напряжение генератора GFG-8219A, установите амплитуду сигнала на входе четырехполюсника (канал 1 осциллографа) равной 5 В.

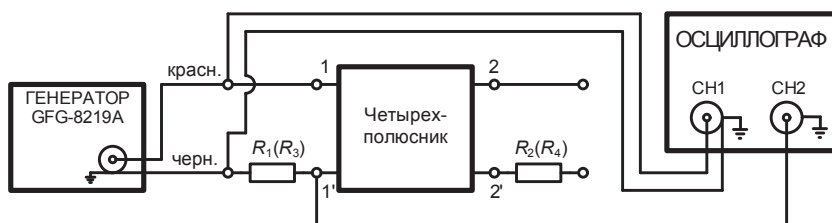


Рис. 7.4. Схема измерения входных сопротивлений Z_{1XX} и Z_{1K3}

4.3. Измерьте амплитуду сигнала на входе четырехполюсника U_{mBX} (канал 1 осциллографа). Измерьте амплитуду сигнала на токосъемном сопротивлении R_1 (R_3) U_{mR1} (канал 2 осциллографа). Рассчитайте модуль входного сопротивления

$$|Z_{1XX}| = \frac{U_{mBX}}{I_{mBX}} = \frac{U_{mBX} \cdot R_1}{U_{mR1}}.$$

Определите временной сдвиг t_3 между сигналами в каналах осциллографа. Если сигнал в канале 2 отстает от сигнала в канале 1, то t_3 необходимо взять с «-», если опережает, то с «+». Рассчитайте сдвиг фаз между током и напряжением на входе четырехполюсника $\Delta\varphi$, рад $= 2\pi \cdot f \cdot t_3$ или $\Delta\varphi$, град $= 360 \cdot f \cdot t_3$. Рассчитайте комплексное входное сопротивление $Z_{1XX} = |Z_{1XX}| \cdot e^{-j\Delta\varphi}$.

4.4. Соедините зажимы 2–2' четырехполюсника перемычкой (рис. 7.4). Повторите измерения величин $U_{mвх}$, U_{mR1} , t_3 . По результатам измерений рассчитайте комплексное сопротивление $Z_{1\text{ КЗ}}$ аналогично п. 4.3.

4.5. Соберите схему для измерения входных сопротивлений $Z_{2\text{ ХХ}}$ и $Z_{2\text{ КЗ}}$ (рис. 7.5). Измерьте амплитуды сигналов на входе четырехполюсника $U_{mвх}$ (канал 1 осциллографа) и на токосъемном сопротивлении R_2 (R_4) U_{mR2} (канал 2 осциллографа). Определите временной сдвиг t_3 . Рассчитайте величины $|Z_{2\text{ ХХ}}|$, $\Delta\varphi$, $Z_{2\text{ ХХ}}$ по формулам, аналогичным п. 4.3.

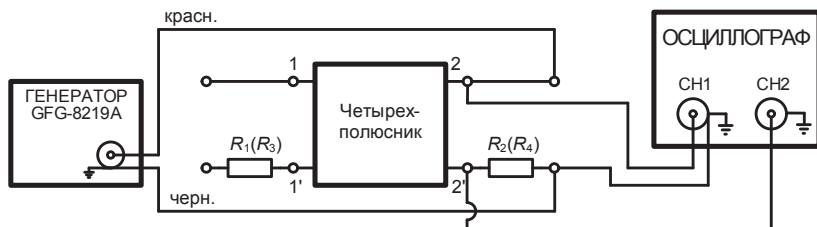


Рис. 7.5. Схема измерения входных сопротивлений $Z_{2\text{ ХХ}}$ и $Z_{2\text{ КЗ}}$

4.6. Соедините зажимы 1–1' четырехполюсника перемычкой (рис. 7.5). Повторите измерения величин $U_{mвх}$, U_{mR2} , t_3 аналогично предыдущему пункту. По результатам измерений рассчитайте комплексное сопротивление $Z_{2\text{ КЗ}}$.

4.7. Соберите схему для измерения АЧХ и ФЧХ коэффициента передачи по напряжению в режиме холостого хода (рис. 7.6).

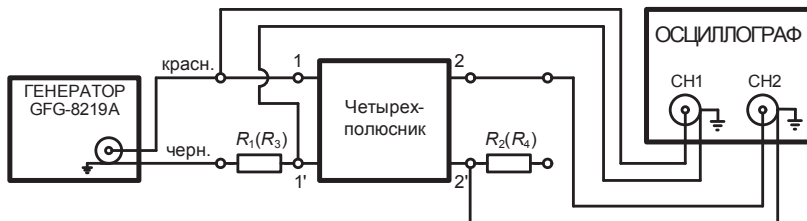


Рис. 7.6. Схема измерения АЧХ и ФЧХ

Установите амплитуду сигнала на входе четырехполюсника (канал 1 осциллографа) равной 5 В. Выполните измерения амплитуд сигналов на входе U_{m1} и на выходе U_{m2} четырехполюсника и временного сдвига t_3 между ними в интервале частот от $0,25f_1$ до $10f_1$. Результаты измерений занесите в таблицу.

Таблица 7.2

f , Гц	$0,25f_1$	$0,5f_1$	f_1	$2f_1$	$4f_1$	$10f_1$
U_{m1} , В						
U_{m2} , В						
t_3 , мс						
$K_U(f)$						
$\varphi_U(f)$, град						

5. Обработка результатов

5.1. Используя полученные в результате эксперимента комплексные сопротивления Z_{1XX} , Z_{1K3} , Z_{2XX} , Z_{2K3} , рассчитайте A -параметры четырехполюсника. Для Π -образного (I) четырехполюсника рассчитайте Y -параметры, для T -образного (II) — Z -параметры. Составьте таблицу сравнения первичных параметров, полученных в расчетной части и в результате эксперимента.

5.2. По экспериментальным Y (Z)-параметрам составьте Π -образную (T -образную) схему замещения. Определите, из каких элементов состоят ветви схемы замещения, определите их параметры. Сравните с исходно заданной в расчетной части схемой четырехполюсника.

5.3. По результатам п. 4.7 рассчитайте АЧХ $K_U(f) = U_{m2} / U_{m1}$ и ФЧХ $\varphi_U(f)$, град $= 360 \cdot f \cdot t_3$. Постройте графики АЧХ и ФЧХ. Проверьте выполнение соотношения (7.10).

5.4. Сформулируйте выводы по проделанной работе.

6. Контрольные вопросы

1. Что понимается под термином четырехполюсник? В каких случаях имеет смысл рассматривать электрическую цепь в виде четырехполюсника?
2. Какой четырехполюсник называется обратимым? Какой четырехполюсник называется симметричным?
3. Что понимается под первичными параметрами четырехполюсника? Какие существуют системы первичных параметров?
4. Какие существуют способы определения первичных параметров?
5. Что такое сопротивления холостого хода и короткого замыкания? Как по ним определить первичные параметры?
6. Какими свойствами обладают первичные параметры обратимого четырехполюсника?
7. Какой физический смысл имеют Y , Z , A -параметры?
8. Как связан комплексный коэффициент передачи по напряжению четырехполюсника с его первичными параметрами?
9. Как построить Π -образную схему замещения четырехполюсника?
10. Как построить T -образную схему замещения четырехполюсника?

Лабораторная работа № 8

Переходные процессы в цепях первого и второго порядков

1. Цель работы

Практическое знакомство с переходными процессами в цепях первого и второго порядка. Исследование импульсных и переходных характеристик.

2. Основные теоретические положения

В установившемся режиме токи и напряжения всех ветвей электрической цепи изменяются по гармоническому закону (если цепь находится под гармоническим воздействием) или сохраняют постоянные значения (если цепь находится под воздействием постоянного напряжения или тока). Любое изменение топологии цепи или параметров входящих в нее элементов (подключение или отключение ветвей, изменение параметров пассивных элементов или параметров источников энергии) приводит к нарушению установившегося режима и называется коммутацией. С течением времени (теоретически через бесконечно большой промежуток времени) цепь перейдет в новый установившийся режим. Процессы, имеющие место в цепи при переходе от одного установившегося режима к другому, называются переходными.

Коммутация осуществляется мгновенно, а начало отсчета времени переходного процесса совмещают с моментом коммутации $t = 0$. Если в момент коммутации не происходит изменения значений индуктивностей и емкостей, то справедливы законы коммутации:

$$i_L(0_+) = i_L(0_-) \text{ и } u_C(0_+) = u_C(0_-), \quad (8.1)$$

где $i_L(t)$ — мгновенное значение тока в индуктивности, $u_C(t)$ — мгновенное значение напряжения на емкости, $t = 0_+$ — момент времени непосредственно после коммутации, $t = 0_-$ — момент времени непосредственно перед коммутацией.

Задача анализа переходных процессов состоит в определении законов изменения токов и напряжений после коммутации, т.е. при $t \geq 0$. Для анализа переходных процессов может использоваться классический или операторный метод. Классический метод основан на составлении и решении дифференциального уравнения (ДУ) цепи после коммутации, т.е. при $t \geq 0$, которое имеет вид:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = f(t), \quad (8.2)$$

где $y(t)$ — искомая реакция цепи (ток или напряжение), $a_0 \dots a_n$ — коэффициенты, зависящие от параметров элементов, n — порядок цепи, равный числу реактивных элементов, $f(t)$ — функция, описывающая воздействие. Для однозначного определения реакции $y(t)$ необходимо знать ее значение и значения $(n-1)$ ее производных в начальный момент времени $t = 0_+$. Для этого необходимо задать начальные условия.

Независимые начальные условия представляют собой токи в индуктивностях $i_{L0} = i_L(0) = i_L(0_+)$ и напряжения на емкостях $u_{C0} = u_C(0) = u_C(0_+)$ в начальный момент времени после коммутации. Они находятся из анализа цепи до коммутации (при $t < 0$) и законов коммутации (8.1). К зависимым начальным условиям относятся токи и напряжения в других ветвях и их производные в момент времени $t = 0_+$, они находятся с помощью независимых начальных условий и уравнений электрического равновесия, составленных для момента времени $t = 0_+$.

Операторный метод основан на применении преобразования Лапласа. При этом все токи $i(t)$, напряжения $u(t)$, ЭДС $e(t)$ при $t \geq 0$ заменяются их изображениями $I(p)$, $U(p)$, $E(p)$ соответственно, а идеализированные пассивные элементы заменяются операторными схемами замещения (рис. 8.1). Величины

$$Z_R(p) = R, \quad Z_L(p) = pL, \quad Z_C = \frac{1}{pC} \quad (8.3)$$

называются операторными сопротивлениями соответственно сопротивления, индуктивности, емкости. Далее составляются уравнения электрического равновесия для изображений с помощью законов Ома и Кирхгофа в операторной форме или методов расчета, аналогичных методам расчета цепей при гармоническом воздействии. В результате решения этих уравнений находятся изображения интересующих токов $I(p)$ и напряжений $U(p)$ и затем восстанавливаются оригиналы $i(t)$ и $u(t)$. Как правило, для поиска изображений и оригиналов используют свойства и таблицы прямого и обратного преобразования Лапласа.

Для радиотехнических цепей более характерен режим, когда топология цепи неизменна, а внешнее воздействие изменяется по произвольному закону. В этом случае имеет место несколько коммутаций, вызванных изменением параметров воздействия. При этом потребуется несколько раз решать задачу анализа пе-

реходных процессов классическим или операторным методом, каждый раз совмещая начало отсчета времени с моментом коммутации. Значительно удобнее решить такую задачу, зная определенные характеристики цепи.

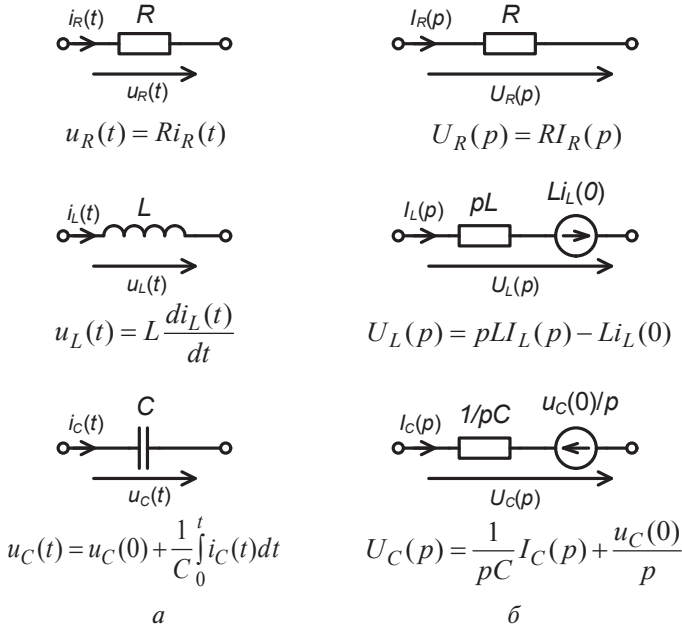


Рис. 8.1. Схемы замещения идеализированных пассивных элементов:

а — для мгновенных значений, *б* — операторные

Переходной характеристикой $g(t)$ электрической цепи называется реакция $y(t)$ на воздействие $x(t)$ в виде функции включения (функции Хевисайда) $1(t)$, см. рис. 8.2, при нулевых начальных условиях:

$$g(t) = y(t) \Big|_{x(t)=1(t), \text{ Н.У.}=0} \quad (8.4)$$

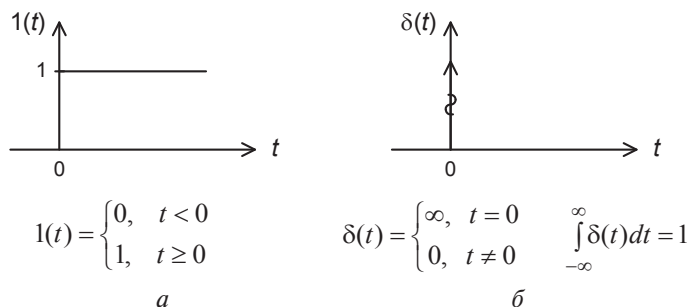


Рис. 8.2. Специальные функции:

a — функция включения (Хевисайда), *б* — дельта-функция (Дирака)

Импульсной характеристикой $h(t)$ электрической цепи называется реакция $y(t)$ на воздействие $x(t)$ в виде дельта-функции (функции Дирака) $\delta(t)$, см. рис. 8.2, при нулевых начальных условиях:

$$h(t) = y(t) \Big|_{x(t)=\delta(t), \text{ н.у.}=0} \quad (8.5)$$

Если воздействие $x(t)$ является сложной функцией, которую можно представить в виде совокупности функций включения: $x(t) = \sum_k X_k 1(t - t_k)$, то, согласно теореме о суперпозиции, реакция линейной электрической цепи будет представлять собой совокупность переходных характеристик: $y(t) = \sum_k X_k g(t - t_k)$.

Например, если воздействие представляет собой последовательность прямоугольных импульсов (рис. 8.3), то его можно описать следующим образом:

$$x(t) = X_0 1(t) - X_0 1(t - \tau_{\text{н}}) + X_0 1(t - T) - X_0 1[t - (T + \tau_{\text{н}})] + \\ + X_0 1(t - 2T) - X_0 1[t - (2T + \tau_{\text{н}})].$$

В этом случае реакция

$$y(t) = X_0 g(t) - X_0 g(t - \tau_{\text{и}}) + X_0 g(t - T) - X_0 g[t - (T + \tau_{\text{и}})] + \\ + X_0 g(t - 2T) - X_0 g[t - (2T + \tau_{\text{и}})].$$

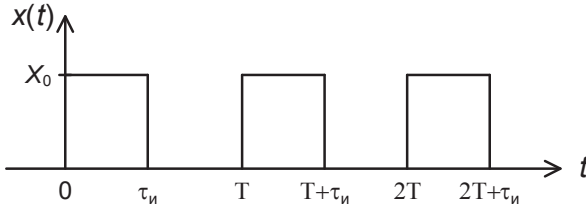


Рис. 8.3. Последовательность прямоугольных импульсов

В случае произвольного воздействия $x(t)$, заданного при $t \geq 0$, реакция линейной электрической цепи по ее переходной характеристике определяется с помощью интеграла наложения (интеграла Дюамеля):

$$y(t) = x(0)g(t) + \int_0^t \frac{dx(\theta)}{d\theta} g(t - \theta) d\theta. \quad (8.6)$$

Если представить воздействие в виде совокупности дельта-функций: $x(t) = \sum_k S_k \delta(t - t_k)$, то, согласно теореме о суперпозиции и определению импульсной характеристики (8.5), реакция линейной цепи $y(t) = \sum_k S_k h(t - t_k)$. И в случае произвольного воздействия $x(t)$, заданного при $t \geq 0$, реакция цепи по ее импульсной характеристике определяется с помощью интеграла свертки:

$$y(t) = \int_0^t x(\theta) h(t - \theta) d\theta. \quad (8.7)$$

Интеграл наложения и интеграл свертки составляют суть временного метода анализа прохождения сигналов через линейные цепи.

Для определения переходной и импульсной характеристик можно подать на вход цепи тестовое воздействие $x(t)$ в виде функции включения $1(t)$ или дельта-функции $\delta(t)$ и решить задачу анализа переходных процессов классическим или операторным методом при нулевых начальных условиях. Реакцией цепи $y(t)$ в этом случае будет соответствующая временная характеристика. На практике данные характеристики чаще находят по операторной характеристике цепи:

$$H(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} \bigg|_{\text{Н.У.}=0}, \quad (8.8)$$

где $Y(p)$ — изображение по Лапласу реакции $y(t)$, $X(p)$ — изображение по Лапласу воздействия $x(t)$, Н. У. — начальные условия. Операторная характеристика $H(p)$ обладает свойствами, аналогичными свойствам комплексной частотной характеристики $H(j\omega)$ (см. лабораторную работу № 5) и связана с ней соотношением:

$$H(j\omega) = H(p) \big|_{p=j\omega}. \quad (8.9)$$

Операторная характеристика находится по операторной схеме замещения цепи, составленной при нулевых начальных условиях. Временные характеристики связаны с операторной характеристикой следующими соотношениями:

$$g(t) = L^{-1} \left\{ \frac{H(p)}{p} \right\}, \quad h(t) = L^{-1} \{ H(p) \}, \quad (8.10)$$

где $g(t)$ — переходная, $h(t)$ — импульсная характеристики, L^{-1} — оператор обратного преобразования Лапласа.

Кроме того, временные характеристики обладают свойством:

$$g(t), h(t) = 0 \quad \text{при } t < 0, \quad (8.11)$$

и связаны между собой следующими соотношениями:

$$g(t) = \int_0^t h(t) dt \quad \text{и} \quad h(t) = g(0) \cdot \delta(t) + \frac{d}{dt}[g(t)]. \quad (8.12)$$

Например, для последовательной RC -цепи (рис. 8.4, а) если считать $u_{\text{вх}}(t)$ воздействием, а $u_{\text{вых}}(t)$ реакцией, то операторная характеристика $H(p)$ будет иметь смысл операторного коэффициента передачи по напряжению (см. лаб. работу № 5, табл. 5.1) и определится следующим образом (см. рис. 5.1):

$$\begin{aligned} H_{RC}(p) &= \left. \frac{U_{\text{вых}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} \right|_{H.Y.=0} = K_U(p) = \frac{Z_2(p)}{Z_1(p) + Z_2(p)} = \\ &= \frac{1/pC_2}{R_3 + 1/pC_2} = \frac{1/R_3C_2}{p + 1/R_3C_2}. \end{aligned}$$

Используя соотношения (8.10) и таблицы преобразования Лапласа, находим импульсную характеристику:

$$h_{RC}(t) = \frac{1}{R_3C_2} e^{-t/R_3C_2} = \frac{1}{R_3C_2} e^{-t/\tau_{RC}},$$

где $\tau_{RC} = R_3C_2$ — постоянная времени RC -цепи. Используя соотношения (8.12), находим переходную характеристику:

$$g_{RC}(t) = \frac{1}{R_3C_2} \int_0^t e^{-t/\tau_{RC}} dt = \frac{(-\tau_{RC})}{R_3C_2} e^{-t/\tau_{RC}} \Big|_0^t = 1 - e^{-t/\tau_{RC}}.$$

Аналогично можно определить временные характеристики последовательной CR -цепи (рис. 8.4, б). Операторная характеристика

$$H_{CR}(p) = \left. \frac{U_{\text{ВЫХ}}(p)}{U_{\text{ВХ}}(p)} \right|_{H.Y.=0} = \frac{R_3}{1/pC_2 + R_3} = \frac{p}{p + 1/R_3C_2}.$$

Переходная характеристика

$$g_{CR}(t) = L^{-1} \left\{ \frac{H(p)}{p} \right\} = L^{-1} \left\{ \frac{1}{p + 1/R_3C_2} \right\} = e^{-t/\tau_{RC}},$$

а импульсная

$$h_{CR}(t) = g(0) \cdot \delta(t) + \frac{d}{dt}[g(t)] = \delta(t) - \frac{1}{\tau_{RC}} e^{-t/\tau_{RC}}.$$

Таким же образом определяются временные характеристики последовательной RLC -цепи (рис. 8.4, в).

$$H_{RLC}(p) = \left. \frac{U_{\text{ВЫХ}}(p)}{U_{\text{ВХ}}(p)} \right|_{H.Y.=0} = \frac{1/pC_2}{R + pL_3 + 1/pC_2} = \frac{1/L_3C_2}{p^2 + (R/L_3)p + 1/L_3C_2},$$

где $R = R_3 + R_{L_3}$. Обозначив через $\omega_0 = 1/\sqrt{L_3C_2}$ резонансную частоту и через $\alpha = R/2L_3$ — коэффициент затухания, получаем

$$H_{RLC}(p) = \frac{\omega_0^2}{p^2 + 2\alpha p + \omega_0^2} = \frac{\omega_0^2}{(p - p_1)(p - p_2)} = \frac{A_1}{p - p_1} + \frac{A_2}{p - p_2},$$

где p_1 и p_2 — корни полинома знаменателя, равные:

$$p_1 = -\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \text{ и } p_2 = -\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}. \quad (8.13)$$

A_1 и A_2 — постоянные коэффициенты, $A_1 = -A_2 = \frac{\omega_0^2}{p_1 - p_2}$.

В соответствии с (8.10) и таблицами преобразования Лапласа импульсная характеристика

$$h_{RLC}(t) = \frac{\omega_0^2}{p_1 - p_2} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}). \quad (8.14)$$

Характер переходного процесса в RLC -цепи зависит от соотношения между величинами α и ω_0 в выражениях (8.13), которое в свою очередь зависит от соотношения параметров элементов цепи. Если суммарное сопротивление потерь $R > R_{кр}$, где $R_{кр}$ — критическое сопротивление, рассчитываемое по формуле:

$$R_{кр} = 2\sqrt{\frac{L_3}{C_2}}, \quad (8.15)$$

то переходной процесс имеет аperiodический характер, в этом случае $\alpha > \omega_0$, корни p_1, p_2 (8.13) получаются отрицательными вещественными и импульсная характеристика описывается выражением (8.14).

Если $R = R_{кр}$, то $\alpha = \omega_0$ и $p_1 = p_2 = -\alpha$, в этом случае переходной процесс называется критическим, и

$$h_{RLC}(t) = \lim_{p_1 \rightarrow p_2} \frac{\omega_0^2}{p_1 - p_2} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) = \omega_0^2 \cdot t \cdot e^{-\alpha t}.$$

Если $R < R_{кр}$, то $\alpha < \omega_0$ и корни p_1, p_2 (8.13) получаются комплексно сопряженными:

$$p_1 = -\alpha + j\omega_{\text{св}} \text{ и } p_2 = -\alpha - j\omega_{\text{св}},$$

где $\omega_{\text{св}} = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$ — частота свободных колебаний. В этом случае имеет место колебательный переходной процесс, и выражение (8.14) для импульсной характеристики преобразуется к виду:

$$h_{RLC}(t) = \frac{\omega_0^2}{2j\omega_{\text{св}}} e^{-\alpha t} (e^{j\omega_{\text{св}}t} - e^{-j\omega_{\text{св}}t}) = \frac{\omega_0^2}{\omega_{\text{св}}} e^{-\alpha t} \sin \omega_{\text{св}}t.$$

Т. е. импульсная характеристика представляет собой синусоиду с амплитудой, убывающей по закону затухающей экспоненты, постоянная времени цепи в этом случае характеризует скорость затухания колебаний и определяется следующим образом:

$$\tau_{RLC} = \frac{1}{\alpha} = \frac{2L_3}{R}. \quad (8.16)$$

Переходную характеристику $g_{RLC}(t)$ последовательной RLC -цепи можно найти, проинтегрировав импульсную характеристику по формулам (8.12).

Теоретически переходной процесс длится бесконечно долго, но, учитывая, что $e^{-3} \approx 0,05$, а $e^{-5} \approx 0,007$, на практике длительность переходного процесса принимают равной $(3-5)\tau_{\text{цепи}}$.

3. Расчетная часть

Данные для расчетов находятся в таблице в лаборатории.

3.1. Рассчитайте импульсные и переходные характеристики цепей, схемы которых приведены на рис. 8.4, а, б (RC и CR). Результаты расчетов представьте в виде графиков в едином масштабе.

3.2. Рассчитайте постоянные времени RC и CR -цепей τ_{RC} .

3.3. Для схемы на рис. 8.4, *в* (RLC) рассчитайте:

- сопротивление потерь $R_{кр}$, соответствующее границе апериодического и колебательного режимов;
- постоянную времени τ_{RLC} при $R = 0,5R_{кр}$, где R — сопротивление потерь цепи (в лабораторной работе $R = R_3 + R_{L3}$, где R_3 — переменное);
- частоту свободных колебаний $f_{св}$ при $R = 0,5R_{кр}$.

3.4. Для RLC -цепи (рис. 8.4, *в*) рассчитайте и постройте в едином масштабе импульсные и переходные характеристики при $R = 0,5R_{кр}$ и $R = 2R_{кр}$.

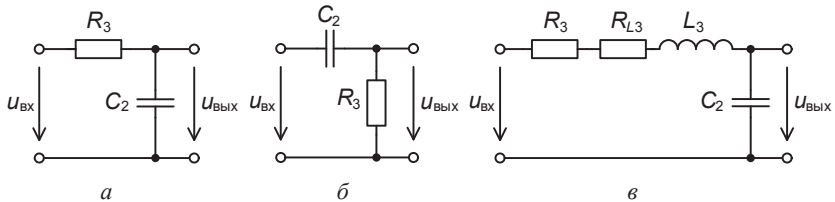


Рис. 8.4. Схемы исследуемых цепей

3.5. Для схем на рис. 8.4, *а*, *б* (RC и CR) рассчитайте и постройте временные диаграммы напряжений на выходе $u_{вых}(t)$, если на вход цепи в момент времени $t = 0$ подается последовательность прямоугольных видеоимпульсов (рис. 8.3) длительностью $\tau_{и}$ с периодом следования $T = 2\tau_{и}$. Расчет и построение графиков выполните на интервале $t [0, 3T]$ для двух случаев: $\tau_{и} = 0,5\tau_{RC}$ и $\tau_{и} = 5\tau_{RC}$. Начальные условия считайте нулевыми.

3.6. Для RLC -цепи (рис. 8.4, *в*) рассчитайте и постройте временную диаграмму напряжения на выходе $u_{вых}(t)$, если на вход цепи в момент времени $t = 0$ подается последовательность прямоугольных видеоимпульсов (рис. 8.3) длительностью $\tau_{и} = 10\tau_{RLC}$ с периодом следования $T = 2\tau_{и}$. Начальные условия нулевые. Расчет и построение графиков выполните для $R = 0,5R_{кр}$ и для $R = 2R_{кр}$ на интервале времени $t [0, 3T]$.

3.7. Изучите методику и порядок выполнения работы.

4. Экспериментальная часть

Работа выполняется на блоке «Простые и сложные цепи».

4.1. При помощи универсального вольтметра В7–77 измерьте сопротивления R_3 , R_{L3} , сравните с заданными (R_3 переменное, его необходимо установить в положение максимального сопротивления).

4.2. Соберите схему для исследования переходных процессов (рис. 8.5). В качестве исследуемой цепи подключите цепь R_3C_2 (рис. 8.4, а). Переключатель генератора сигналов стенда поставьте в положение $\square\square\square$, а ручку «Уровень» — в среднее положение.

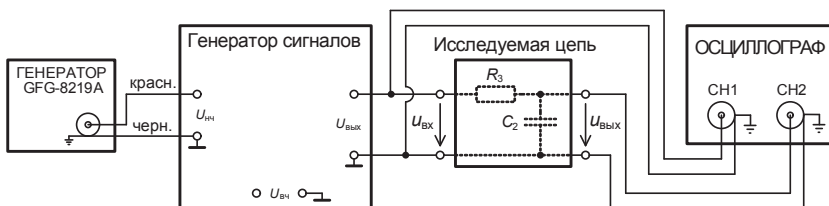


Рис. 8.5. Схема установки для исследования переходных процессов

4.3. После проверки схемы преподавателем включите питание приборов и лабораторного стенда. Установите на генераторе GFG-8219A следующие параметры — гармонический сигнал, частота $f_1 = 1/10\tau_{RC}$, ручку «AMPL» установите в среднее положение.

Установите переключатели осциллографа OS-5020 в следующие положения: режим работы «MODE» — «DUAL», режим синхронизации «MODE» — «AUTO», источник синхронизации «TRIGGER SOURCE» — «CH1». Убедитесь, что в канале 1 осциллографа (на входе цепи) присутствуют прямоугольные импульсы, а в канале 2 (на выходе цепи) импульсы, соответствующие расчетным.

Ручкой «Уровень» генератора сигналов стенда установите амплитуду прямоугольных импульсов на входе цепи равной 5 В (импульсы однополярные). Расположите входной сигнал в верхней части экрана осциллографа, а выходной — в нижней, масштабы выберите таким образом, чтобы каждый сигнал занимал 30–50 % экрана и наблюдалось 2–4 периода.

4.4. Зарисуйте осциллограмму напряжения на выходе цепи, измерьте его основные параметры — амплитуду, период, длительность нарастания, длительность спада.

4.5. Повторите пп. 4.4. для частот генератора $f_2 = 1 / 4\tau_{RC}$ и $f_3 = 1 / \tau_{RC}$. Осциллограммы для каждой частоты необходимо зарисовывать на отдельном рисунке.

4.6. Уменьшите R_3 вдвое. Повторите пп. 4.4. для частоты f_1 . Зарисуйте осциллограмму на одном рисунке с осциллограммой для номинального значения R_3 для частоты f_1 . По графикам определите постоянную времени τ_{RC} цепи для двух значений R_3 .

4.7. Повторите пп. 4.2–4.4 для цепи C_2R_3 (рис. 8.4, б).

4.8. Подключите к выходу генератора сигналов цепь $R_3L_3C_2$ (рис. 8.4, в). Установите частоту генератора GFG-8219A $f_4 = 1 / 20\tau_{RLC}$, где τ_{RLC} — постоянная времени RLC -цепи, рассчитанная для $R = 0,5 R_{кр}$. Ручкой «Уровень» генератора сигналов стенда установите амплитуду прямоугольных импульсов на входе цепи равной 5 В (импульсы однополярные).

4.9. Зарисуйте осциллограммы напряжения на выходе RLC -цепи и измерьте основные параметры (амплитуду, период, длительность нарастания, длительность спада, частоту свободных колебаний) при $R_i + R_{L3} + R_3 = 2R_{кр}$ и при $R_i + R_{L3} + R_3 = 0,5R_{кр}$, где $R_i \approx 10 \text{ Ом}$ — внутреннее сопротивление генератора импульсов. Величину сопротивления R_3 измеряйте универсальным вольтметром В7–77, предварительно отключив его от схемы, и устанавливайте таким образом, чтобы выполнялись указанные равенства.

5. Обработка результатов

В отчете должны быть приведены графики, рассчитанные при подготовке к работе и полученные в ходе эксперимента. Экспериментальные графики для каждой цепи для каждой частоты строятся на отдельном рисунке. На графиках изображаются входные и выходные сигналы, указываются масштабы по осям, и основные измеренные параметры сигнала. Далее формулируются выводы.

6. Контрольные вопросы

1. Что называется коммутацией, переходным процессом?
2. Поясните содержание и физический смысл законов коммутации.
3. Дайте определение переходного и установившегося режимов работы.
4. Что такое начальные условия, как определяются, где используются?
5. В чем состоит классический метод анализа переходных процессов?
6. В чем состоит операторный метод анализа переходных процессов?
7. Дайте определение переходной характеристики. Укажите ее свойства, способы нахождения.
8. Дайте определение импульсной характеристики. Укажите ее свойства и способы нахождения.
9. Что такое операторная характеристика? Укажите ее свойства, способ определения и как она связана с временными характеристиками.
10. Как определить реакцию цепи на произвольное внешнее воздействие по переходной характеристике?

11. Как определить реакцию цепи на произвольное внешнее воздействие по импульсной характеристике?
12. Как определить постоянную времени RC , RL , RLC цепей:
а) по известным параметрам цепей; б) по переходной характеристике?
13. Какой характер может иметь переходной процесс в RLC -цепи и от чего он зависит?
14. Что такое частота свободных колебаний? Как связана частота свободных колебаний с резонансной частотой RLC -цепи?

Приложение 1

Описание приборов

Генератор сигналов низкочастотный GFG-8219A

1. Общая характеристика [7]

Генератор GFG-8219A представляет собой функциональный генератор сигналов специальной формы из серии 8215—8255 с генерацией стабильных сигналов с низким уровнем искажений в диапазоне частот до 5 МГц.

Генератор GFG-8219 A обладает следующими функциями: логарифмическое и линейное качание частоты; амплитудная или частотная модуляция выходного сигнала с управлением от внутреннего либо внешнего источника; встроенный частотомер с возможностью измерения внешних сигналов частотой до 150 МГц. К дополнительным возможностям прибора можно отнести: управление временем качания и полосой частот, как в линейном, так и логарифмическом режиме; а также управление скважностью выходного сигнала.

Передняя и задняя панели генератора представлены на рис. П1. На передней панели располагаются органы управления и индикации и BNC-разъем главного выхода, поз. 22. На задней панели располагаются BNC-разъемы: дополнительного выхода (CMOS/TTL output), поз. 20, входа управления частотой и модуляцией (VCF/MOD), поз. 21, внешнего входа частотомера (EXT Counter), поз. 19 и синхровыхода (GCV), поз. 23.

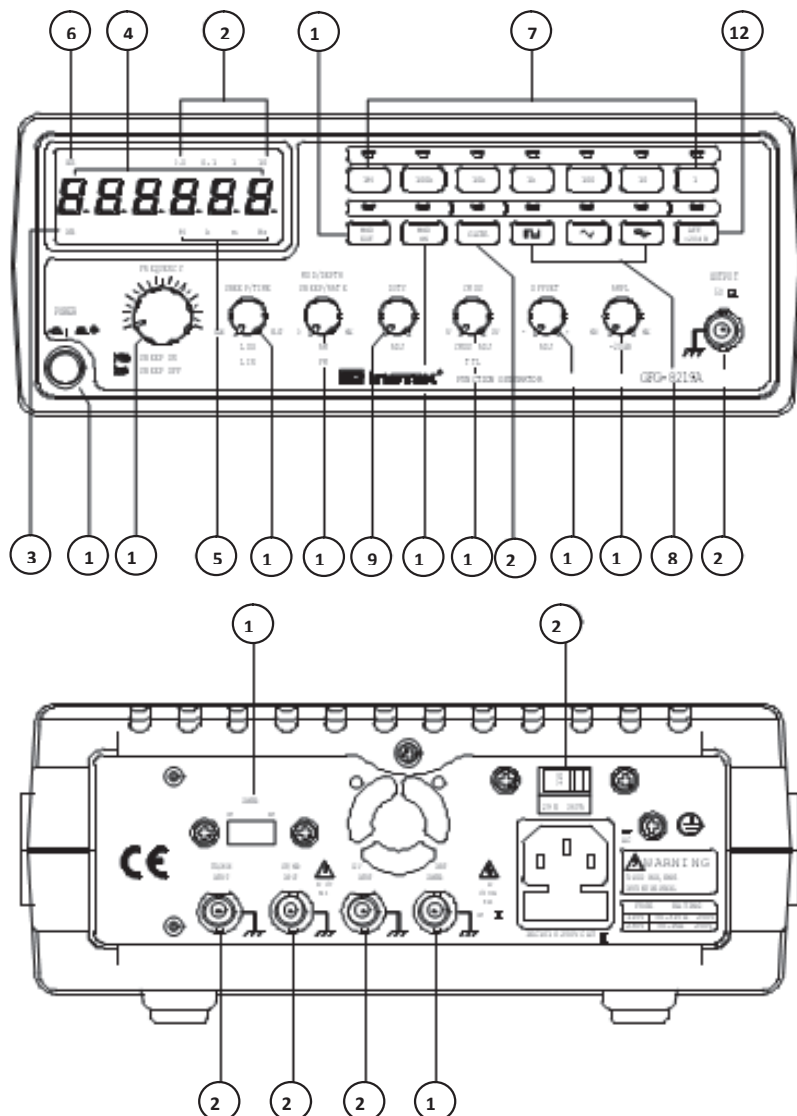


Рис. П1. Внешний вид генератора GFG-8219A

Генератор используется в работах, где требуется источник переменного сигнала, в работах по исследованию прохождения амплитудно-модулированного сигнала, а также в работах, где требуется генератор качающейся частоты. Для двух последних применений потребуются дополнительные подключения: вход управления частотой и модуляцией — VCF/MOD и синхровыход — GCV, расположенные на задней панели прибора. Предлагается эти подключения выполнить посредством двух кабелей, один конец которых с BNC-разъемом подключается к генератору, а второй конец непосредственно запаян к плате стенда «Микшер сигналов для ГКЧ».

2. Назначение ручек управления, индикаторов, разъемов

1 — выключатель питания	Для работы прибора подключите шнур питания и нажмите кнопку
2 — индикатор времени стробирования	После включения индикатор начинает мигать (время стробирования счетчика составляет 0,01 сек)
2 а — переключатель времени стробирования	Нажимая эту кнопку в режиме внешнего частотомера, можно циклически изменять время стробирования в порядке: 0,01 сек, 0,1 сек, 1 сек, 10 сек.
3 — индикатор перегрузки	В режиме внешнего частотомера индицирует, что измеряемая частота больше, чем выбранный диапазон
4 — индикация частоты	На дисплее зеленого свечения индицирует: частоту внешнего сигнала на 6-ти разрядах и частоту внутреннего сигнала на 5-ти разрядах
5 — индикация единицы измерения частоты	Отображает текущую единицу измерения частоты: Hz, m, kHz, MHz
6 — индикация времени строба	Отображает текущее время стробирования счетчика (используется только в режиме внешнего счета)
7 — переключатель частотного диапазона	Нажмите соответствующую кнопку переключателя, для требуемого частотного диапазона: 0,3—3 Гц, 3—30 Гц, 30—300 Гц, 300—3 кГц, 3—30 кГц, 30—300 кГц, 300—3000 кГц

8 — переключатель вида выходного сигнала	Нажмите одну из трех кнопок для выбора требуемого вида выходного сигнала
9 — регулятор асимметрии выходного сигнала	Вытяните и вращайте ручку для установки нужного коэффициента асимметрии выходного сигнала
10 — TTL/CMOS переключатель	При нажатой ручке на выходе TTL/CMOS, поз. 20, будет генерироваться TTL совместимый сигнал, если вытянуть и вращать ручку, можно устанавливать амплитуду CMOS совместимого сигнала в диапазоне 5–15 В
11 — регулятор сдвига постоянного уровня	Вытяните ручку для регулировки смещения постоянного уровня выходного сигнала: вращайте по часовой стрелке для установки положительного сдвига и в обратную сторону для установки отрицательного сдвига
12 — установка амплитуды выходного сигнала с функцией аттенюатора	Вращайте по часовой стрелке ручку для увеличения амплитуды выходного сигнала до максимума и, в обратную сторону — для ослабления до –20 dB, вытянув ручку, можно добиться дополнительного ослабления в –20 dB
13 — переключатель РУЧН/КАЧАНИЕ, совмещенный с установкой частоты	Нажмите и вращайте ручку по часовой стрелке для увеличения и в обратную сторону — для уменьшения частоты (сохраняйте указатель в пределах диапазона масштаба на панели). Вытяните ручку для старта режима качания: верхняя частота диапазона качания определяется позицией ручки
14 — переключатель LIN/LOG, совмещенный с установкой времени качания	Вращайте ручку по часовой стрелке для увеличения и в обратную сторону — для уменьшения временного интервала качания. Линейный режим качания частоты устанавливается при нажатой ручке, логарифмический режим — при вытянутой ручке
15 — переключатель ВКЛ/ВЫКЛ модуляции выхода	При вытянутой ручке выходной сигнал может быть модулирован: либо внутренним синус-сигналом 400 Гц, либо внешним, поданным на разъем CVF/MOD, поз. 21
16 — управление глубиной модуляции и диапазоном качания, совмещенное с переключателем вида модуляции	Ширина (диапазон) качания может быть от 0 до 1000 раз. Для установки этого параметра, так же как и глубины модуляции, вращайте ручку по часовой стрелке для увеличения и в обратную сторону — для уменьшения. Нажатая ручка задает АМ-модуляцию, вытянутая — FM-модуляцию

17 — переключатель ВНУТР/ВНЕШН модуляция	При нажатии на кнопку загорается индикатор и выбирается режим модуляции ВНЕШ, при последующем нажатии индикатор гаснет и выбирается режим ВНУТР
18 — переключатель ВНУТР/ВНЕШН частотомер	Переключатель на задней панели выбирает режим частотомера — внутренней частоты, либо внешней, поступающей на BNC-разъем, поз.19
19 — BNC-разъем для внешнего сигнала	Подключается цепь для измерения частоты внешнего сигнала
20 — BNC-разъем TTL/CMOS	Выход сигнала, совместимого с уровнями TTL/CMOS
21 — BNC-разъем VCF/MOD	Вход для подключения управляющего напряжения либо частотой (VCF) либо амплитудой (MOD) выходного сигнала
22 — BNC-разъем основного выхода генератора	Основной выход сигнала генератора (нагрузка 50 Ом)
23 — BNC-разъем GCV	Выход постоянного напряжения, пропорционального изменению частоты (синхровыход)
24 — переключатель напряжения силовой сети	Выбор напряжения питающей сети 115 В, 230 В

3. Технические данные генератора GFG-8219 A

Основной выход	
Диапазон частот	0,3 Hz to 3 MHz (7 поддиапазонов)
Амплитуда	>10Vp-p (на 50 Ом нагрузку)
Импеданс	50 ohm \pm 10 %
Аттенюатор	–20dB \pm 1dB x 2
Постоянное смещение	< –5V ~ >5V (на 50 Ом нагрузку)
Управление асимметрией	80 %: 20 %: 80 % to 1MHz (плавная регулировка)
Дисплей	6 разрядный LED
Синусоидальный сигнал	
Искажение сигнала	<1 % 0,3 Hz ~ 200 kHz, THD < 35 dB below fundamental in all ranges (Specification applied from MAX. to 1/10 level)

Равномерность АЧХ	<0,3 dB; 0,3 Hz ~ 300 kHz; <0,5 dB; 100 kHz ~ 3 MHz
Прямоугольный сигнал	
Симметричность	+2 %, 0,3 Hz ~ 100 kHz
Фронт/спад сигнала	< 50ns at maximum output (на 50 Ом нагрузку)
Треугольный сигнал	
Линейность	>98 % 0,3 Hz ~ 100 kHz, > 95 % 100 kHz ~ 3 MHz
CMOS выход	
Фронт/спад сигнала	<120 nS
Уровень сигнала	4Vpp + 1Vpp ~ 14,5Vpp + 0,5Vpp (регулиру- емый)
TTL выход	
Фронт/спад сигнала	<25 nS
Нагрузочная способность	20 TTL load
Уровень сигнала	>3Vpp (регулируемый)
Вход управления частотой VCF	
Входное напряжение	0V~10V \pm 1V (100: 1)
Входной импеданс	10k ohm \pm 10 %
Синхровыход GCV	
Выходное напряжение	В диапазоне 0V ~ 2V в соответствии с частотой
Качание частоты	
Авто/Ручное	Переключатель
Диапазон	100: 1 ratio max. (регулируемое)
Время развертки	0,5 sec ~ 30 sec (регулируемое)
Режим ЛИН/ЛОГ	Переключатель
Амплитудная модуляция	
Глубина модуляции	0—100 %
Частота модуляции	400 Hz (внутренняя), DC ~ 1 MHz (внешняя)
Частотный диапазон несущей	100 Hz ~ 3 MHz (на уровне -3dB)
Чувствительность внеш- няя	<10Vpp для 100 % модуляции

Частотная модуляция	
Девиация	0 ~ + 5 %
Частота модуляции	400 Hz (внутренняя), Dc ~ 20 kHz (внешняя)
Внешняя чувствительность	<10Vpp для 10 % модуляции
Частотомер	
Внутренний/внешний	Переключатель
Диапазон	0,3 Hz ~ 3 MHz (5 Hz ~ 150 MHz Внешний вход)
Точность	Time base accuracy ± 1 младший разряд
Time Base	$\pm 10\text{PPM}$ (23 °C \pm 5 °C) после 30 минут прогрева
Разрешение	Максимальное разрешение 10 nHz для 1 Hz и 100 nHz для 100 MHz
Входной импеданс	1 MOhm/150 pF
Чувствительность	<35 mVrms (5 Hz ~ 100 MHz), < 45 mVrms (100 MHz ~ 150 MHz)

Осциллограф OS-5020

1. Общая характеристика [8]

Осциллограф OS-5020 является осциллографом с полосой пропускания от 0 до 20 МГц и индикацией сигналов 2 каналов. Осциллограф предназначен для широкого круга применений, таких как производство, сервис, научные исследования и учеба.

Его особенности:

- функция суммирования ADD позволяет измерять сумму двух сигналов;
- осциллограф имеет режим работы X-Y, регулируемый уровень синхронизации и схему разделения ТВ-сигнала для независимой синхронизации по строкам и по кадрам для наблюдения композитных видеосигналов.

Осциллограф OS-5020C дополнительно снабжен схемой проверки радиоэлементов для определения их исправности.

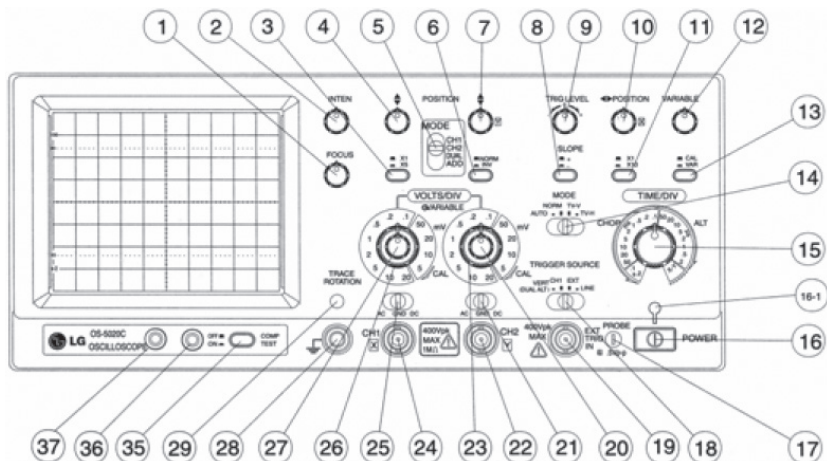


Рис. П2. Внешний вид передней панели осциллографа OS-5020C

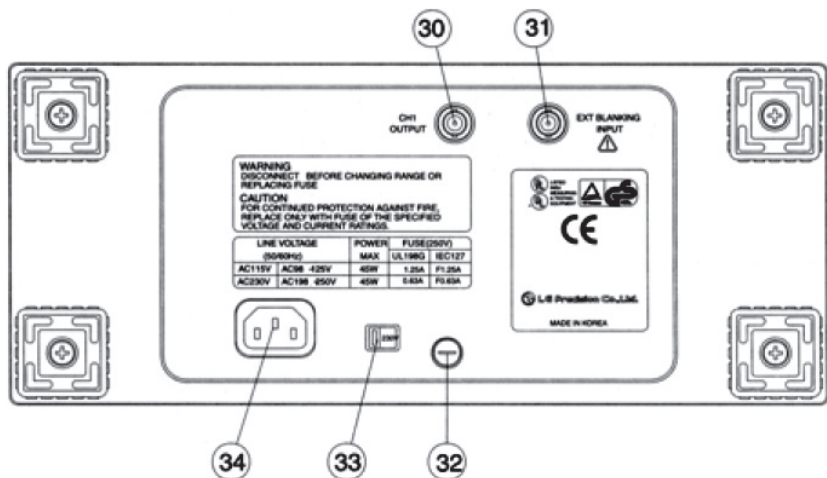


Рис. П2. Внешний вид задней панели осциллографа OS-5020C

2. Технические данные

Параметр	Спецификация
* ЭЛТ	
1) внешний вид	6-дюймовый прямоугольный экран с внутренней градуировкой, 8x10 делений для измерения времени фронта импульса
2) ускоряющий потенциал	+1,9 кВ (относительно катода)
3) фосфорное покрытие	P31 (стандарт)
4) фокусировка	регулируемая
5) поворот луча	обеспечивается
6) регулировка яркости луча	есть
* вход Z (модуляция яркости)	
1) входной сигнал	сигнал положительной полярности увеличивает интенсивность луча, заметная модуляция яркости наступает при амплитуде + 5 В
2) полоса пропускания	0–2 МГц (–3 дБ)
3) вход	открытый (DC)
4) входной импеданс	20 КОм — 30 КОм
5) макс. вх. напряжение	30 В (пост. + перем.)
* вертикальное отклонение	
1)полоса пропускания (–3 дБ) открытый вход (DC)	0–20 МГц, нормальный режим 0–10 МГц, режим усиления (только для канала 1)
закрытый вход (AC)	0–20 МГц, нормальный режим 0–10 МГц, режим усиления (только для канала 1)
2) режимы	CH1, CH2, ADD, DUAL (CHOP: 0,2 сек — 1 мсек, ALT: 0,5 мсек — 0,2 мсек)
3) чувствительность	5 мВ/дел — 20 В/дел, 12 режимов, шаг 1-2-5. Плавная регулировка 1:2,5 усилитель x5 (x5 MAG): 1 мВ/дел — 1 В/дел, 10 режимов (только для CH1)
4) точность	нормальный режим: $\pm 3\%$, режим уси- ления (x5 MAG): $\pm 5\%$
5) входной импеданс	приблизительно 1 МОм 30 пФ

6) макс. входное напряжение	напрямую: 400 В (постоянного + переменного амплит.), с пробником: см. спецификацию пробника
7) режимы входа	DC (открытый вход) — GND (земля) — AC (закрытый вход)
8) длительность фронта	$\leq 17,5$ нсек ($\times 5$ MAG: ≤ 35 нсек)
9) выход сигнала CH1	25 мВ/дел. ± 20 %, импеданс 50 Ом, полоса пропускания 20 Гц — 10 МГц (–3 дБ)

3. Назначение ручек управления, индикаторов, разъемов

3.1. Блок дисплея и включения прибора

(16) выключатель питания	служит для включения/выключения прибора
(16–1) лампочка «питание»	загорается при включении прибора
(2) регулировка интенсивности	служит для регулировки яркости луча дисплея, при вращении по часовой стрелке яркость возрастает
(1) регулировка фокуса	служит для получения максимальной резкости луча
(29) регулировка «вращение»	позволяет с помощью отвертки выставить луч параллельно горизонтальной градуировочной линии дисплея.
(33) переключатель напряжения	позволяет работать при различных питающих напряжениях
(34) разъем шнура питания	позволяет заменять шнур питания

3.2. Блок усилителя по вертикали

(24) разъем CH1 или вход X	для подачи входного сигнала на усилитель канала 1 или в режиме X-Y для подачи входного сигнала на усилитель горизонтальной развертки
----------------------------	--

(22) разъем CH2 или вход Y	для подачи входного сигнала на усилитель канала 2 или в режиме X-Y для подачи входного сигнала на усилитель вертикальной развертки
(25) переключатель AC/GND/DC канала 1	для выбора режима подачи сигнала канала 1 на усилитель вертикального отклонения; положение AC подключает конденсатор между входом канала и входом усилителя, тем самым отсекая постоянную составляющую сигнала; положение GND заземляет вход усилителя; положение DC подключает вход усилителя к сигналу напрямую, таким образом весь сигнал поступает на усилитель
(21) переключатель AC/GND/DC канала 2	для выбора режима подачи сигнала канала 2 на усилитель вертикального отклонения
(26) переключатель VOLTS/DIV канала 1	для выбора коэффициента усиления по вертикали канала 1, шаг 1:2:5
(23) переключатель VOLTS/DIV канала 2	для выбора коэффициента усиления по вертикали канала 2, шаг 1:2:5
(27) (20) регулятора VARIABLE	для плавного изменения коэффициента усиления в пределах одного шага VOLTS/DIV; измерения напряжения по дисплею при этом делать некорректно; измерения можно проводить только при крайнем положении рукоятки VARIABLE по часовой стрелке (до щелчка)
(3) переключатель X5 MAG	для увеличения коэффициента усиления вертикального усилителя в 5 раз, при этом максимальная чувствительность составляет 1 мВ/деление
(4) регулировка CH1 POSITION	позиционирование положения луча канала 1 по вертикали
(7) регулировка CH2 POSITION	позиционирование положения луча канала 2 по вертикали
(6) переключатель CH2 INV	при переключении полярность сигнала канала 2 инвертируется
(5) переключатель V MODE	для выбора режима индикации вертикального усилителя

CH1	на дисплее высвечивается только канал 1
CH2	на дисплее высвечивается только канал 2
DUAL	на дисплее высвечиваются оба канала одновременно
ADD	на дисплее высвечивается алгебраическая сумма сигналов 1-го и 2-го каналов
(30) разъем CH1 OUTPUT	выход сигнала канала 1 для подачи его на частотомер и т. п.

3.3. Блок развертки и синхронизации

(15) переключатель TIME/DIV	для выбора калиброванной скорости развертки или для работы в режиме X-Y
(12) ручка VARIABLE	для плавной регулировки скорости развертки в пределах одного шага переключателя TIME/DIV; скорость развертки соответствует показаниям переключателя TIME/DIV только при положении ручки VARIABLE в крайнем положении по часовой стрелке, до щелчка
(11) переключатель X10MAG	для растяжки изображения по горизонтали в 10 раз (увеличения эффективной скорости развертки в 10 раз)
(10) ручка POSITION блока HORIZONTAL	для выставления горизонтального положения лучей на ЭЛТ; вращение по часовой стрелке сдвигает лучи вправо
(14) переключатель режима синхронизации	для выбора режима синхронизации развертки
AUTO	в этом режиме при отсутствии сигнала синхронизации луч свободно разворачивается на экране, при появлении сигнала синхронизации частотой свыше 25 Гц развертка автоматически переключается на синхронизируемую по сигналу при условии, что регулировки синхронизации настроены правильно
NORM	в этом режиме луч разворачивается только при появлении сигнала синхронизации при условии, что регулировки синхронизации настроены правильно; режим используется при частоте сигналов свыше 25 Гц

TV—V	для наблюдения видеосигналов с кадровой частотой
TV-H	для наблюдения видеосигналов с частотой строчной развертки
переключатель источника синхронизации	для выбора оптимального источника синхронизации
VERT	источником синхронизации становятся сигналы каналов CH1 и CH2; если переключатель (5) V MODE находится в режиме DUAL, то сигналы разворачиваются на экране попеременно на всех диапазонах TIME/DIV
CH1	выбирает источником синхронизации сигнал на входе 1-го канала
LINE	в этом режиме развертка синхронизируется с питающим напряжением переменного тока; что позволяет наблюдать сигналы, связанные с питающим напряжением, даже если они малы по сравнению с другими компонентами входного сигнала
EXT	выбирает источником синхронизации сигнал на входе EXT TRIG IN
NORM	режим выбирается поворотом ручки в крайнее положение против часовой стрелки; служит для наблюдения за простыми сигналами
(9) ручка TRIGGER LEVEL блока синхронизации	для выбора амплитуды сигнала синхронизации, при которой запускается развертка: при повороте по часовой стрелке точка срабатывания сдвигается в сторону положительных значений; при повороте против часовой стрелки точка срабатывания сдвигается в сторону отрицательных значений
(8) переключатель SLOPE (полярности синхросигнала) на ручке TRIGGER LEVEL	для выбора синхронизации по фронту сигнала: при вытянутой ручке синхронизация идет по положительному фронту; при утопленной — по отрицательному фронту
(19) разъем EXT TRIG IN	для подачи внешних сигналов синхронизации

4. Порядок работы с прибором

4.1. Предварительные установки и настройки

4.1.1. Перед работой с инструментом установите регулировки в следующее положение:

переключатель POWER (16)	выключен (отжат)
ручка INTEN (яркость) (2)	в среднем положении
ручка FOCUS (1)	в среднем положении
переключатели AC/GND/DC (25) (21)	в положении DC (открытый вход)
переключатели VOLTS/DIV (26) (23)	10 mV
переключатель X5 MAG (3)	в положении X1
ручки VERTICAL POSITION (4) (7)	в среднем положении
переключатель INV (6)	в положении NORM
ручки VARIABLE (27) (20)	по часовой стрелке до упора
переключатель VERTICAL MODE (5)	в положении CH1
переключатель TIME/DIV (15)	в положении 1 ms
ручка VARIABLE CONTROL (13)	в положении CAL
ручка HORIZONTAL POSITION (10)	в среднем положении
переключатель X10 MAG (11)	в положении X1
переключатель синхронизации MODE (14)	в положении AUTO
переключатель SOURCE (18)	в положении VERT
ручка LEVEL синхронизации (9)	в среднем положении
переключатель SLOPE (8)	отжат

4.1.2. Установите шнур питания в разъем шнура питания (34) и подключите шнур к розетке с сетевым напряжением.

4.1.3. Нажмите выключатель питания POWER (16). Загорится лампочка (16—1). Спустя 30 секунд поверните ручку INTEN по часовой стрелке до появления луча на экране. Установите яркость по своему усмотрению.

4.2. Работа в однолучевом режиме

Работа с использованием одного луча и одной развертки с внутренней синхронизацией является наиболее элементар-

ным использованием осциллографа серии OS-5020. Используйте этот режим при необходимости наблюдения одного лишь входа или если мешает другой луч на экране. Поскольку осциллограф двухканальный, можно выбрать требуемый канал. Вход 1 имеет выходной разъем; используйте вход 1 если вы хотите наблюдать сигнал и одновременно измерять его частоту. Вход 2 имеет переключатель, инвертирующий полярность сигнала. Но при работе с одним лучом этот режим не слишком полезен.

Для работы с использованием только одного луча сделайте следующее.

4.2.1. Установите переключатели, как показано ниже. Запомните, что переключатель входа синхронизации (CH1 или CH2 SOURCE) должен соответствовать выбранному входу.

переключатель POWER (16)	включен
переключатели AC/GND/DC (25) (21)	в положении AC (вход по переменной составляющей)
ручки POSITION блока VERTICAL (4) (7)	в среднем положении
регулировки VARIABLE (27) (20)	по часовой стрелке до упора
переключатель VERTICAL MODE (5)	в положении CH1 (CH2)
ручка VARIABLE (13)	в положении CAL
переключатель синхронизации MODE (14)	в положении AUTO
переключатель синхронизации SOURCE (18)	в положении VERT
ручка синхронизации LEVEL (9)	в среднем положении

4.2.2. Используйте ручки VERTICAL POSITION (4) или (7) для установки луча в средней части экрана.

4.2.3. Подключите источник сигнала к соответствующему входу (24) или (22) и отрегулируйте амплитуду сигнала переключателем (26) или (23) так, чтобы сигнал занимал всю высоту экрана.

4.2.4. Установите переключатель A TIME/DIV (15) так, чтобы на экране наблюдалось требуемое количество периодов ис-

следуемого переменного сигнала. Для одних измерений оптимальным будет 2–3 периода, для других это 50–100 циклов. При необходимости вращением ручки синхронизации LEVEL (9) добейтесь стабильной картинки на дисплее.

4.2.5. Если наблюдаемый сигнал настолько мал, что даже в положении регулятора VOLT/DIV на 5 мВ невозможно получить устойчивую синхронизацию и качественные наблюдения, установите переключатель X5MAG в положение X5 для повышения чувствительности канала в 5 раз. Это дает чувствительность в 1 мВ/деление при переключателе VOLT/DIV, установленном на 5 мВ/деление. Однако полоса пропускания при этом уменьшается до 10 МГц, и возможно появление заметных шумов.

4.2.6. Если наблюдаемый сигнал имеет такую высокую частоту, что даже в положении регулятора TIME/DIV на 0,2 мксек/деление сигнал на экране слишком сжат, установите переключатель X10 MAG (11) в положение X10. При этом скорость развертки луча возрастет в 10 раз, так что в положении развертки 0,2 мксек/дел. развертка станет равной 20 нсек/деление, 0,5 мксек/деление превратятся в 50 нсек/деление и т. д.

4.2.7. Если исследуемый сигнал имеет низкую частоту или является постоянным, так что подключение его через «закрытый» вход (только по переменной составляющей) приводит к искажению формы, переключите тумблеры входов AC/GND/DC (25) или (21) на режим DC (с постоянной составляющей).

4.3. Работа в двухлучевом режиме

Режим работы с двумя лучами является основным режимом работы для осциллографов серии OS-5020.

Установки для этого режима идентичны установкам для работы с одним лучом за исключением:

4.3.1. Установите переключатель VERTICAL MODE (5) в положение DUAL. Выберите режим ALT для относительно высокочастотных сигналов (TIME/DIV установлен на 0,5 мсек или быстрее). Выберите режим CHOP для относительно низкоча-

стотных сигналов (TIME/DIV установлен на 1 мсек или медленнее).

4.3.2. Если оба канала показывают сигналы одной частоты, установите переключатель синхронизации SOURCE (18) на канал с сигналом с большей крутизной фронтов. Если сигналы разные, но кратны друг другу, установите переключатель SOURCE на канал с сигналом с меньшей частотой повторения. Помните также, что, отсоединив сигнал, синхронизирующий развертку, вы потеряете стабильное изображение другого сигнала.

4.4. Синхронизация

Получение устойчивой синхронизации изображения является наиболее трудной операцией при работе с осциллографом, т. к. существует множество вариантов сигналов и задач их визуализации.

Выбор режима синхронизации. Если переключатель синхронизации стоит в положении NORM, луч на экране не будет разворачиваться, пока не поступит синхронизирующий сигнал. Однако этот режим неудобен, т. к. на экране нет луча в отсутствии сигнала или при неправильно установленном уровне синхронизации. Поскольку отсутствие луча может быть связано с неправильными установками регулировок вертикального положения или чувствительности VOLT/DIV, на установление причины может быть потрачено много времени. Режим AUTO решает эту проблему, разворачивая луч на экране при отсутствии синхронизации. При этом на экране видна горизонтальная полоса при отсутствии сигнала или несинхронизированное изображение сигнала при отсутствии синхронизации развертки. Это сразу указывает на причину ошибки настройки. Единственная проблема с AUTO состоит в том, что сигналы с частотой менее 25 Гц и сложные сигналы с разными частотами не могут синхронизироваться или синхронизируются нестабильно. Поэтому обычно переключатель MODE устанавливают на AUTO, но переключают на NORM, если при вход-

ном сигнале (особенно ниже 25 Гц) осциллограф не способен обеспечить стабильную синхронизацию.

Положения TV-V и TV-H переключателя MODE служат для подключения селектирующих узлов в цепь синхронизации с тем, чтобы выделить синхроимпульсы вертикальной (кадровой) и горизонтальной (строчной) развертки в телевизионном сигнале. Чтобы наблюдать кадры изображения, установите переключатель в положение TV-V, если хотите наблюдать строки, установите переключатель в положение TV-H. Для достижения лучших результатов выделяются синхроимпульсы отрицательной полярности.

5. Проведение измерений

Измерение пикового значения напряжения

Для измерения пиковых значений напряжения сигнала выполните следующие действия:

1. Установите предварительно регулировки вертикального отклонения, как показано в разделе 4.1.

2. Поворотом ручки TIME/DIV (15) установите длительность развертки так, чтобы на экране помещалось два-три периода переменного сигнала, а переключателем VOLT/DIV добейтесь размаха сигнала на весь экран.

3. Соответствующими ручками VERTICAL POSITION (4) или (7) совместите отрицательный пик сигнала с ближайшей снизу горизонтальной градуировочной линией дисплея, как показано на рис. П.4.

4. Ручкой Horizontal POSITION (10) добейтесь совмещения положительного пика сигнала с центральной вертикальной градуировочной линией. Эта линия имеет дополнительную разметку с шагом в 0,2 клетки.

5. Сосчитайте количество клеток по вертикали между отрицательным пиком сигнала (градуировочной линией) и точкой пересечения положительного пика с центральной вертикаль-

ной градуировочной линией. Умножьте это число на масштаб переключателя $VOLT/DIV$ для получения истинного значения амплитудного размаха сигнала. Например, если переключатель $VOLT/DIV$ установлен на 2 вольта, то для осциллограммы рис. П.4 размах будет составлять 8,0 вольт ($4,0 \text{ деления} \times 2 \text{ В}$).

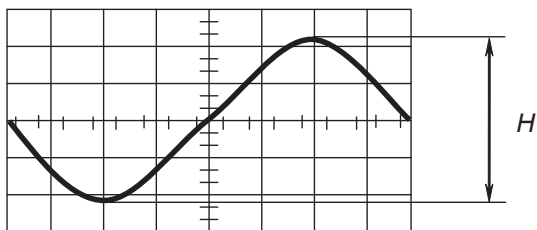


Рис. П.4. Измерение полного размаха переменного напряжения

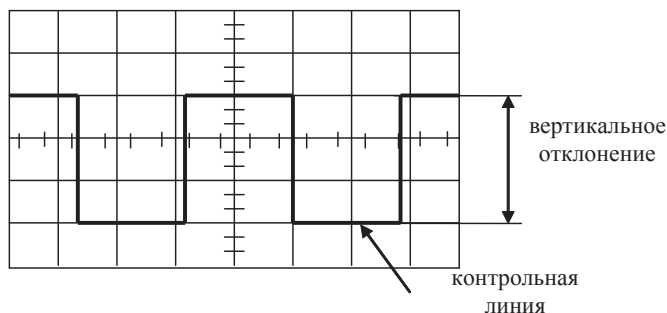


Рис. П. 5. Измерение переменного напряжения с постоянной составляющей

6. При использовании умножителя $\times 5$ в канале вертикального отклонения луча для получения истинного значения разделите полученное в п. 5 значение на 5. При использовании аттенюатора пробника $10X$ умножьте полученное значение на 10.

7. При измерении синусоидальных сигналов с частотой повторения менее 100 Гц или сигналов прямоугольной формы

с частотой повторения менее 1000 Гц установите переключатель AC/GND/DC в положение DC.

Пример. Предположим, что величина изображения по вертикали H равна 4,8 деления и при измерении используется внешний делитель напряжения 1:10. Переключатель «V/дел.» находится в положении «0,5».

Размах напряжения сигнала составит
 $4,8 \text{ дел.} \cdot 0,5 \text{ В/дел.} \cdot 10 = 24 \text{ В.}$

Амплитуда гармонического напряжения составляет половину размаха.

Измерение временных интервалов

Другой важной измерительной функцией осциллографа является измерение временных интервалов. Это возможно, поскольку развертка калибрована и цена деления клетки градуировочной сетки известна.

Основной режим измерения временных интервалов описан ниже. Те же действия используются при проведении других измерений.

1. Установить переключатели, как описано в разделе 4.2. для одноручевого режима работы.

2. Установить переключатель TIME/DIV (15) так, чтобы временной интервал, подлежащий измерению, занимал весь экран. Убедитесь, что кнопка VAR (13) установлена в положение CAL.

3. Вращением ручки VERTICAL POSITION (4) или (7) расположите луч так, чтобы центральная горизонтальная линия сетки проходила через точки осциллограммы, между которыми производятся измерения.

4. Ручкой Horizontal POSITION (10) совместите левую измеряемую точку осциллограммы сигнала с ближайшей вертикальной градуировочной линией.

5. Сосчитайте количество клеток по горизонтали между левой точкой в п. 4 и следующей измеряемой точкой. Учтите, что дополнительная разметка выполнена с шагом в 0,2 клетки.

6. Для определения интервала между двумя измеряемыми точками умножьте количество клеток, сосчитанных в п. 5, на масштаб переключателя TIME/DIV. Если при измерениях была нажата кнопка растяжки в 10 раз X10MAG (11), полученное значение необходимо разделить на 10.

Пример. Допустим, что расстояние между точками составляет 6 делений, а переключатель « $mS/\text{дел.}$ » установлен в положение « $0,2 mS/\text{дел.}$ » (рис. П. 6). Интервал между двумя значениями сигнала $T = 4 \text{ дел.} \cdot 0,2 mS/\text{дел.} = 0,8 \text{ мс}$.



Рис. П. 6. Измерение длительности сигнала и частоты

Измерение частоты

Для измерения частоты периодических сигналов проделайте следующие операции:

- измерьте длительность времени одного периода сигнала;
- рассчитайте частоту сигнала $F_c = 1/T$, где F_c — частота, Гц, T — длительность периода, с.

Пример. Частота сигнала с периодом 0,8 мс будет равна $F_c = 1/0,8 \text{ мс} = 1,2 \text{ кГц}$.

Измерение разности фаз

Разность фаз или фазовый сдвиг между двумя сигналами может быть измерен с использованием обеих лучей осциллографа или при работе осциллографа в режиме X-Y.

Метод с использованием двух лучей. Этот метод применим при сигналах любой формы, фактически он часто работает, даже если используются сигналы разной формы. Этот метод эффективен при измерении больших и малых разностей фаз и на любых частотах вплоть до 20 МГц.

Для проведения измерения разности фаз двухлучевым методом сделайте следующее.

1. Установите настройки осциллографа, как описано в разделе 4.3. Работа в двухлучевом режиме, подключив один сигнал к входу CH1 (24), а другой сигнал — к входу CH2 (22).

2. Установите переключатель SOURCE синхронизации (18) на канал с наиболее чистым и стабильным сигналом. Временно сдвиньте луч другого канала с экрана по вертикали ручкой Vertical POSITION.

3. Поместите луч стабильного сигнала в центр экрана по вертикали и установите его амплитуду равной точно 6 клеткам, используя переключатель VOLT/DIV и регулировку VARIABLE.

4. Ручкой TRIGGER (9) блока синхронизации установите луч так, чтобы он пересекал центральную горизонтальную градуировочную линию в начале или недалеко от начала развертки (рис. П. 6.).

5. Регулировками TIME/DIV (15), VARIABLE (12) и Horizontal POSITION (10) установите длительность одного периода повторения сигнала равной 7,2 деления сетки. После этого каждая клетка градуировочной сетки будет равна 50° , а каждое маленькое деление будет равно 10° .

6. Ручкой Vertical POSITION верните выведенный с экрана луч второго канала, точно выставив его по центру экрана. При помощи переключателя VOLT/DIV и связанной с ним ручки VARIABLE установите амплитуду сигнала равной ровно 6 клеткам.

7. Расстояние по горизонтали между соответствующими точками осциллограмм и будет разностью фаз. Например, на рисунке разность фаз равна 6 малым делениям, что составляет 60° .

8. Если разность фаз меньше 50° , нажмите кнопку X10 для включения режима X10 MAG — растяжки изображения сигнала в 10 раз, и, при необходимости используя ручку Horizontal POSITION, сместите в требуемое положение область измерения. При десятикратной растяжке изображения каждая клетка будет равна 5° , а каждое маленькое деление — 1° .

Вольтметр универсальный В7–77

1. Общая характеристика [9]

Вольтметр универсальный В7–77 предназначен для измерения постоянного и переменного напряжения, постоянного и переменного тока, электрического сопротивления постоянному току, тестирования полупроводниковых диодов и проверки электрических цепей на короткое замыкание («прозвонка»).

Вольтметр обеспечивает измерение постоянного напряжения положительной и отрицательной полярностей до 1000 В с конечными значениями пределов $U_{\text{п}} = 200$ мВ, 2, 20, 200, 1000 В.

Вольтметр обеспечивает измерение переменного напряжения синусоидальной формы до 750 В с конечными значениями пределов $U_{\text{п}} = 200$ мВ, 2, 20, 200, 750 В. При этом на пределе измерений 750 В вольтметр обеспечивает измерение напряжения переменного тока синусоидальной формы в диапазоне частот от 20 Гц до 1 кГц.

Вольтметр обеспечивает измерение силы переменного тока синусоидальной формы до 10 А с конечными значениями пределов $I_{\text{п}} = 2, 20, 200$ мА, 10 А.

Вольтметр обеспечивает измерение сопротивления постоянному току до 20 МОм с конечными значениями пределов $R_n = 200 \text{ Ом}, 2, 20, 200 \text{ кОм}, 2, 20 \text{ МОм}$.

Пределы допускаемой основной погрешности при измерениях имеются в руководстве по эксплуатации прибора.

2. Подготовка к работе

Провести внешний осмотр вольтметра, при котором проверить комплектность, наличие пломб и убедиться в отсутствии внешних видимых поломок. В случае длительного хранения в условиях, отличающихся от нормальных, выдержать вольтметр в нормальных климатических условиях в течение 4 ч.

Для подключения вольтметра к сети питания и объекту измерения использовать соединительные кабели из комплекта поставки.

3. Органы управления, подключения и индикации

На передней панели вольтметра (рис. П. 7) расположены:

- индикатор (поз. 1) для отображения значений измеряемых величин;
- входные гнезда (поз. 2–5) для подключения вольтметра к измеряемому объекту;
- переключатель рода работ и пределов измерений (поз. 6).

На задней панели вольтметра (рис. П. 8) расположены:

- вставки плавкие ВПЗ Б-1 В 10,0 А (поз. 1) и ВП1-1 В 0,5 А (поз. 2) для защиты входных цепей вольтметра при измерении постоянного и переменного токов;
- выключатель «СЕТЬ» для включения напряжения питания вольтметра (поз. 3);

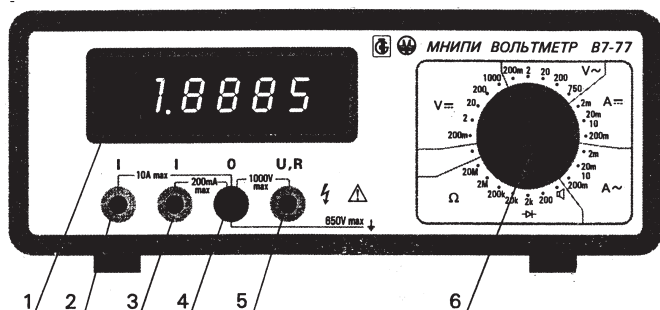


Рис. П. 7. Схема расположения органов управления, подключения и индикации, находящихся на передней панели вольтметра

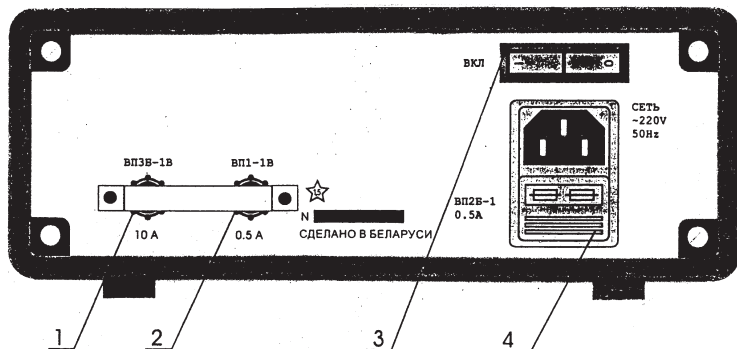


Рис. П. 8. Схема расположения органов подключения, находящихся на задней панели вольтметра

- вилка «~220 V 50 Hz» для подключения вольтметра к питающей сети и отсек с сетевыми вставками плавкими ВП2 В-1 В 0,5 А (поз. 4).

4. Подготовка к проведению измерений

Установить выключатель «СЕТЬ» в положение «О».

Подключить вольтметр к питающей сети с помощью сетевого шнура.

Установить переключатель рода работ и пределов измерений в положение «1000 V».

Установить выключатель «СЕТЬ» в положение «I». Через 5 с на индикаторе установится показание «0000» (допускается мигание знака полярности и ед. мл. разряда).



Вольтметр обеспечивает работоспособность через 1 мин после включения, а метрологические характеристики — через 15 мин.

5. Проведение измерений

Установить переключатель рода работ и пределов измерений в положение, соответствующее выбранному режиму работы.

Подсоединить вольтметр к измеряемому объекту с помощью кабеля, входящего в комплект вольтметра. При этом **необходимо помнить**, что один конец кабеля подсоединяется к гнезду «0» вольтметра, а другой (красный) — к гнезду в соответствии с выбранным режимом работы.

Положение переключателя рода работ и пределов измерений:

-  — при тестировании электрических цепей на короткое замыкание;
-  — при тестировании полупроводниковых диодов.
- «U, R 1000 V max» — при измерении постоянного напряжения, переменного напряжения, сопротивления постоянному току на соответствующих пределах измерений, а также при тестировании электрических цепей на короткое замыкание и тестировании полупроводниковых диодов;

- «I 200 mA max» — при измерении постоянного и переменного токов до 200 мА;
- «I 10 A max» — при измерении постоянного и переменного токов свыше 200 мА.

При измерении **постоянного и переменного токов** более 5 А объект измерения должен быть подключен на время не более 5 мин из-за возможного перегрева измерительного кабеля.

Для более длительной эксплуатации под нагрузкой рекомендуется использовать:

- кабель УШЯИ.685611.238 предприятия-изготовителя, поставляемый по отдельному заказу;
- кабель, изготовленный пользователем (максимальное сопротивление проводов 0,01 Ом).

При измерении **сопротивлений на пределе 200 Ом** учитывать сопротивление подключенного кабеля ($R_{\text{каб}}$). Значение измеряемого сопротивления R в этом случае $R = R' - R_{\text{каб}}$, где R' — показание вольтметра при измерении сопротивления, Ом; $R_{\text{каб}}$ — показание вольтметра при замкнутых концах кабеля, Ом.

Произвести отсчет результата измерения с индикатора вольтметра.

Появление во время измерения на индикаторе вольтметра во всех разрядах «00000» в режиме прерывистой индикации (режим перегрузки) свидетельствует о том, что на вход вольтметра подано напряжение (ток, сопротивление), значение которого превышает допустимое значение конечного предела измерения.

Вольтметр обеспечивает в течение 1 мин гарантированную защиту входных цепей от сигнала перегрузки.

Вольтметр обеспечивает свои технические характеристики в пределах норм по истечении времени установления рабочего режима, равного 15 мин.

Вольтметр допускает непрерывную работу в рабочих условиях применения в течение не менее 16 ч при сохранении своих технических характеристик.

Приложение 2

Описание лабораторного стенда

Лаборатория оснащена стендами [10], на каждом из которых можно выполнить комплекс лабораторных работ, предусмотренных программами курсов ОТЦ и ТЭЦ. Унификация стендов позволяет проводить лабораторные работы фронтальным методом.

Конструктивно стенд выполнен в виде вертикальной несущей панели, прикрепленной к металлическому трубчатому каркасу приборной полочки лабораторного стола.

На несущей панели стенда расположены блоки со схемами, соответствующими определенным лабораторным работам, блок включения электропитания стенда, блок подключения дополнительных работ и блоки, содержащие дополнительные устройства и измерительные приборы.

Лицевые панели блоков снабжены фальшпанелями, на которые нанесены графические изображения схем и необходимые надписи. Сборка электрических схем, а также соединение блоков между собой и подключение измерительных приборов производится путем соединения контактных гнезд перемычками из гибкого многожильного провода со штекерами на концах.







Группа вспомогательных блоков включает в себя:

- генератор сигналов;
- генератор качающейся частоты;
- измеритель разности фаз;
- подключение дополнительных работ.

Генератор сигналов предназначен для формирования различных по форме сигналов с частотой повторения, определяемой внешним воздействием (ГНЧ).

1. Технические характеристики генератора сигналов (ГС)

Вид генерируемого сигнала:

-  — синусоидальный сигнал;
-  — импульсный сигнал прямоугольной формы со скважностью 2 («меандр»);
-  — сигнал треугольной формы;
-  — экспоненциальные импульсы;
-  — короткие («дельта») импульсы;
-  — импульсный сигнал с заполнением (радиоимпульс).

Амплитуда выходного напряжения:

- 10 В на выходе I на нагрузке 8 Ом;
- 10 В на выходе II на нагрузке 600 Ом.

Полоса рабочих частот:

- 100 Гц — 29 кГц на выходе I;
- 20 Гц — 200 кГц на выходе II.

2. Порядок работы с генератором сигналов

1. Напряжение запуска от ГНЧ амплитудой не менее 5 В подать на гнезда « $U_{вх}$ ».
2. Выбрать вид сигнала.
3. При работе в режиме генерации радиоимпульсов на вход « $U_{вч}$ » дополнительно подать сигнал от ГВЧ.
4. Включить блок питания стенда.
5. Проконтролировать качество полученного сигнала при помощи осциллографа. При необходимости подобрать амплитуду высокочастотного сигнала, формирующего радиоимпульсы.

Генератор качающейся частоты (ГКЧ) (рис. П. 9) предназначен для генерации сигнала линейно изменяющейся частоты. Такой сигнал можно использовать для наблюдения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) различных радиоэлектронных устройств.

1. Технические данные

1. Чувствительность по входу «Вх. Детект.» 25 мВ.
2. Диапазон установки частоты разбит на два поддиапазона:
I — 60–200 кГц;
II — 100–350 кГц.
3. Девиация частоты: $\min = \pm 10$ кГц; $\max = \pm 30$ кГц.
4. Уровень выходного напряжения на нагрузке 600 Ом
 $U_{\text{вых}} = 0 \div 1$ В.

Работа с ГКЧ и схемы его подключения подробно описаны в работе № 5.

Измеритель разности фаз (фазометр) предназначен для измерения разности фаз между двумя электрическими сигналами переменного тока произвольной формы.

1. Технические данные

1. Чувствительность по входам « U_1 » и « U_2 » не хуже 50 мВ.
2. Диапазон измерения $0 + 360$ эл. град.
3. Частота измеряемых сигналов не более 100 кГц.
4. Входное сопротивление не менее 200 кОм.

Внешний вид фазометра приведен на рис. П. 10.

2. Порядок работы с прибором

1. Подключить исследуемые напряжения к входным гнездам « U_1 » и « U_2 ».
2. Тумблер «100/400» поставить в нижнее положение («400»), тумблер «+/-» — в положение «+».
3. Включить питание стенда.
4. Включить прибор тумблером «Вкл./Откл.».
5. Произвести отсчет разности фаз по шкале, проградуированной от 0° до 400° .

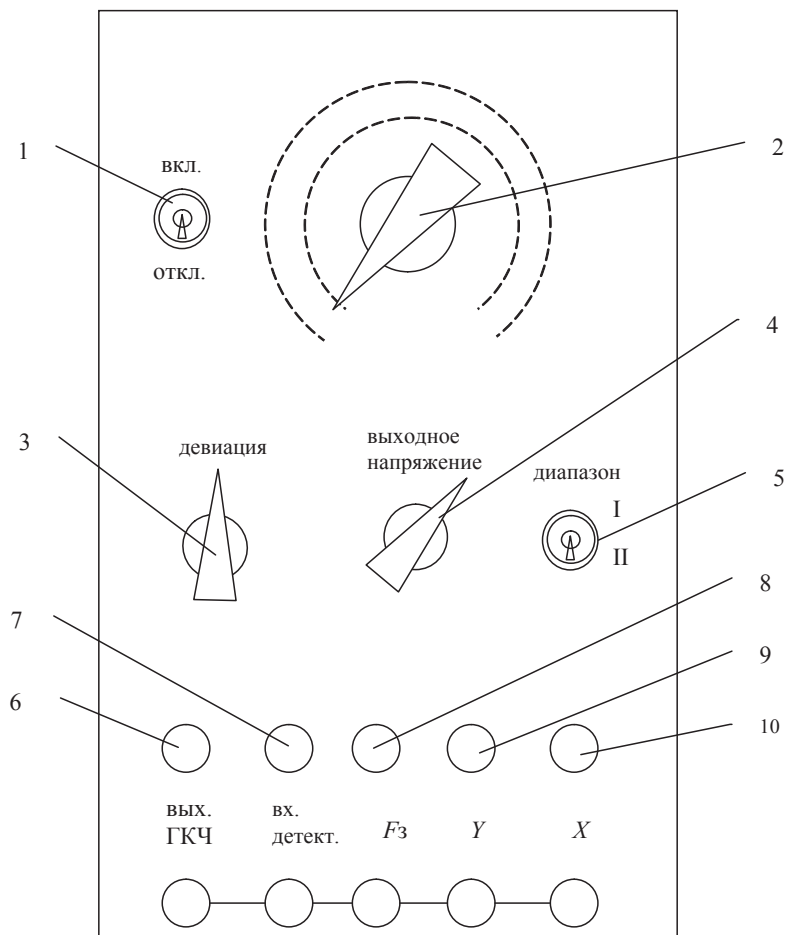


Рис. П. 9. Внешний вид генератора качающейся частоты:

1 — тумблер включения питания прибора; 2 — ручка установки частоты; 3 — ручка установки девиации частоты; 4 — ручка установки выходного напряжения; 5 — тумблер переключения диапазонов; 6 — гнездо «Вых. ГКЧ» — выходной сигнал качающейся частоты; 7 — «Вх. детект.» — вход для подключения исследуемого сигнала; 8 — « F_3 » — подключение генератора меток; 9 — «Y» — подключение канала (внешней развертки) осциллографа

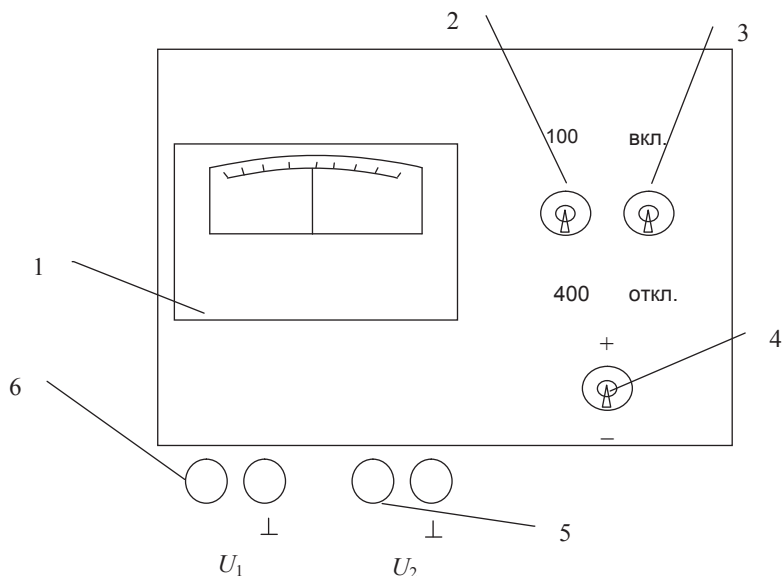


Рис. П. 10. Внешний вид измерителя разности фаз:

1 — измерительная головка; 2 — тумблер переключения пределов измерения «100/400»; 3 — тумблер включения прибора «Вкл./Откл.»; 4 — тумблер переключения опорного напряжения «+/-»; 5, 6 — входные гнезда « U_1 » и « U_2 »

Результат отсчета — разность фаз между напряжениями U_1 и U_2 . Если $\Delta\varphi < 100^\circ$, то уточнить значение измеренной величины можно, поставив тумблер переключения пределов измерения в положение «100». При этом максимальному отклонению стрелки соответствует $\Delta\varphi = 100$. Если $270^\circ < \Delta\varphi < 360^\circ$, то для уточнения значения $\Delta\varphi$ нужно тумблер «+/-» поставить в положение «-», после этого тумблер «100/400» — в положение «100». Произвести отсчет разности фаз между напряжениями U_2 и U_1 по шкале до 100° .

6. По окончании измерений необходимо выключить питание измерителя разности фаз.

Список библиографических ссылок

1. Атабеков Г. И. Основы теории цепей : учебник / 3-е изд., стер. СПб. ; М. ; Краснодар : Лань, 2009. 432 с.
2. Бакалов В. П., Дмитриков В. Ф., Крук Б. И. Основы теории цепей : учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Радио и связь, 2000. 592 с.
3. Попов В. П. Основы теории цепей : учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению «Радиотехника». 6-е изд., испр. М. : Высшая школа, 2007. 575 с.
4. Семенцов В. И., Попов В. П., Бирюков В. Н. Сборник задач по теории цепей : учеб. пособие для студентов вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Высшая школа, 2009. 270 с.
5. Вострецова Е. В. Основы теории цепей : методические указания по выполнению лабораторных работ. Ч. 1. Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. 97 с.
6. Вострецова Е. В. Основы теории цепей : методические указания по выполнению лабораторных работ. Ч. 2. Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. 103 с.
7. Генератор сигналов специальной формы GFG-8215A / GFG-8215A / GFG-8215A / GFG-8215A / GFG-8215A / GFG-8215A. Руководство по эксплуатации. М., 2008. 38 с.
8. Осциллограф универсальный OS-5020. Руководство по эксплуатации. М., 2008. 38 с.
9. Вольтметр универсальный цифровой В7–77. Руководство по эксплуатации. М., 2008. 43 с.
10. Вострецова Е. В., Дягилев И. Л. Ознакомление с измерительными приборами и устройством лабораторного стенда. Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. 37 с.

Учебное издание

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Вострецова Елена Владимировна
Зраенко Сергей Михайлович
Шилов Юрий Владиславович

Редактор Т. Е. Мерц
Компьютерный набор:
Е. В. Вострецова, С. М. Зраенко, Ю. В. Шилов
Верстка О. П. Игнатьевой

Подписано в печать 31.08.2015. Формат 60×84 1/16.
Бумага писчая. Плоская печать. Гарнитура Newton.
Уч.-изд. л. 6,0. Усл. печ. л. 7,9. Тираж 100 экз. Заказ 237

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: 8 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: 8 (343) 350-56-64, 350-90-13
Факс: 8 (343) 358-93-06
E-mail: press-urfu@mail.ru



ВОСТРЕЦОВА ЕЛЕНА ВЛАДИМИРОВНА

доцент, кандидат технических наук. Опыт преподавания дисциплин «Основы теории цепей», «Радиотехнические цепи и сигналы», «Теория электрических цепей» составляет более 25 лет. Область научных интересов — анализ и обработка сигналов; методики и технологии современного высшего образования. Автор более 100 научных и учебно-методических трудов.



ЗРАЕНКО СЕРГЕЙ МИХАЙЛОВИЧ

доцент, кандидат технических наук; читаемые дисциплины: «Теория электрических цепей», «Обнаружение и фильтрация сигналов в неразрушающем контроле», «Цифровая обработка сигналов и изображений».

Область научных интересов — цифровая обработка информации в радиоэлектронных системах космического дистанционного зондирования Земли.

Автор более 150 научных и учебно-методических трудов.



ШИЛОВ ЮРИЙ ВЛАДИСЛАВОВИЧ

старший преподаватель; читаемые дисциплины: «Электротехника и электроника», «Основы теории цепей», «Радиотехнические цепи и сигналы».

Область научных интересов — моделирование электрических цепей и сигналов, системы сбора данных, применение программных средств и информационных технологий к изучению электрических цепей и сигналов.

Автор более 20 научных и учебно-методических работ и 2 патентов.